

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE  
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS.



INVESTIGACIÓN SOBRE PROCESOS AVANZADOS DE  
TRATAMIENTO Y DEPURACIÓN DE LAS AGUAS MEDIANTE  
ELECTROCOAGULACIÓN

Pablo Santiago Hernández Lehmann

Madrid, marzo de 2011



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE  
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS.



INVESTIGACIÓN SOBRE PROCESOS AVANZADOS DE  
TRATAMIENTO Y DEPURACIÓN DE LAS AGUAS MEDIANTE  
ELECTROCOAGULACIÓN

Memoria presentada por D. Pablo Santiago Hernández Lehmann para optar al grado de  
Doctor en Ingeniería de Canales, Caminos y Puertos

Fdo.: Pablo Santiago Hernández Lehmann

VºBº Director de la Tesis Prof. Dr. Ing. Aurelio Hernández Muñoz	

Madrid, marzo de 2011





## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi padre por permitirme pisar, aunque levemente, en las huellas que él ha dejado. Me llena de orgullo ser su hijo.

Mi más sincero agradecimiento a la figura de mi director de Tesis, el Prof. Dr. Ing. Aurelio Hernández Muñoz, Catedrático de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad Politécnica de Madrid, sin cuya dedicación, constancia, esfuerzo, apoyo y orientación profesional, este trabajo no hubiera sido posible.

Mi reconocimiento y gratitud al Dr. Manuel Gil Rodríguez, colaborador científico del CSIC, por sus desinteresados consejos y sus precisas aclaraciones, a la Dra. Abilia Soriano por su intenso esfuerzo y dedicación a lo largo de toda mi tesis. Agradezco sinceramente a Dña. Julia Chamorro por mantenerme al puntualmente día de todos los trámites necesarios para optar al título de doctor.

Agradezco a la Universidad Politécnica de Madrid y al Ministerio del Medio Ambiente, Medio Rural y Marino por el apoyo económico a la investigación, sin el cual hubiese sido inviable poder experimentar a escala semiindustrial. Traslado dicho agradecimiento al CYII por permitirme la instalación y operación de la Planta Piloto en sus instalaciones de la Depuradora de Aguas Residuales de Viveros de la Villa.



**RESUMEN DE LA TESIS DOCTORAL “INVESTIGACIÓN SOBRE PROCESOS AVANZADOS DE TRATAMIENTO Y DEPURACIÓN DE LAS AGUAS MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN”**

El objetivo definitivo de esta investigación es la de buscar un sistema, que siendo sencillo y ocupando poco espacio, pueda aplicarse a las aguas de salida de una depuradora o aguas normales circulando por corrientes fluviales alcanzando calidad para distintos usos. Así se investiga sobre la posibilidad de utilizar el proceso de electrocoagulación sobre distintos parámetros considerados en la normativa sobre reutilización de las aguas “Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (BOE nº 294, 08/12/2007)”.

Se establecen tres fases de investigación. En la primera trabajando en sistema discontinuo, sistema batch, la segunda con una planta de laboratorio en discontinuo, para investigar sobre los parámetros que intervienen en el proyecto, utilizando los resultados en el diseño y construcción de una planta real, 144 l/h, ensayando en la tercera parte sobre la eficacia del proceso de electrocoagulación en el cumplimiento las normativas actuales de reutilización, en relación con la reducción de parámetros físico-químicos de las aguas (SS, turbidez, nitrógeno y fósforo), así como la reducción de la contaminación biológica de las aguas (E. coli, legionella, presencia de parásitos como nematodos y tenia), analizando el consumo energético del proceso.

Se ha deducido la falta de coincidencia entre las experiencias en sistemas discontinuos y continuos del proceso, y se han establecido los parámetros fundamentales para el diseño de la planta piloto, teniendo en cuenta la influencia de la escala. Se han establecido como parámetros fundamentales: Uno de los parámetros básicos de diseño a escala piloto, que se ha considerado, es la relación de superficie electrolítica sobre el volumen de la disolución o del reactor, a escala laboratorio (A/V), que es una medida del potencial para la liberación de coagulante y burbujas a un sistema (sobre una base volumétrica). La densidad de corriente, definida como la corriente por un área activa de electrodo, es otro parámetro de diseño de escala utilizado.

Considerando todo lo anterior se diseñó la planta piloto, en la que el agua a tratar pasa secuencialmente a través de un depósito de pretratamiento, un depósito de procesamiento electroquímico, un depósito de post-tratamiento, que puede pasar a un decantador o a un depósito de flotación.

El electrocoagulador se construyó en metacrilato con unas dimensiones internas de 27,5 x 49,5 x 49,5 cm. En una primera serie de experimentos se establecerían 4 placas de electrodo, 2 cátodos y 2 ánodos de aluminio, y 3 placas intermedias de acero. De la misma forma se trabajó en la segunda línea, pero con placas de hierro. Las dimensiones de las placas de aluminio fueron de 250 x 500 x 1,5 mm, las placas de hierro de 250 x 500 x 1,0 mm. , y el espacio entre electrodos de 4,75 cm. Los electrodos se conectaron a una fuente de alimentación, que tiene una salida variable entre 300 V y 10 A.

La experimentación realizada concluye sobre los buenos resultados de la aplicación del sistema de electrocoagulación, en relación con el grado de cumplimiento respecto a las normativas actuales de reutilización. Los resultados garantizan las posibilidades del proceso en la eliminación de: la turbidez, sólidos suspendidos totales (SST), DQO y fosfatos en fósforo total, así como en la eliminación de microorganismos.

Estos resultados justifican que la electrocoagulación puede constituirse en un sistema de tratamiento y depuración de las aguas tanto en la lucha contra la eutrofización de las aguas, eliminando fosfatos, como en la mejora de las aguas de forma previa al empleo de membranas, como en la mejora de la calidad de las aguas de salida de las depuradoras o circulante por los ríos. Su sencillez, facilidad de montaje y bajo consumo energético lo avalan.

**DOCTORAL THESIS ABSTRACT "RESEARCH ON ADVANCED TREATMENT PROCESSES AND WATER PURIFICATION BY ELECTROCOAGULATION"**

The ultimate goal of this research is to find a system that remains simple and occupying little space, that can be applied to wastewater output or to water from fluvials flows achieving quality for different uses. This work investigates the possibility of using the electrocoagulation process on various parameters used in the regulations on reuse of water "Real Decreto 1620/2007 of December 7, which establishes the legal framework for water reuse treatment (BOE n º 294, 12/08/2007)."

Three stages of research are established. In the first work on discontinuous, batch system, the second with a continuous laboratory plant, to investigate the parameters involved in the project, using the results in the design and construction of a real, 140 l/h, tested in the third part on the effectiveness of the electrocoagulation process in compliance with current regulations for reuse, in relation to the reduction of physical and chemical parameters of water (SS, turbidity, nitrogen and phosphorus) and reducing biological contamination of water (E. coli, Legionella, parasites such as roundworms and tapeworm), analyzing the energy consumption of the process.

The mismatch between the experiences in discontinuous and continuous systems of the process has been deduced, and the basic parameters for the design of the plant have been established, taking into account the influence of the scale. They have been established as key parameters: One of the basic design parameters at pilot scale, which has been considered is the ratio of surface electrolyte on the volume of the solution or the reactor at laboratory scale ( $A / V$ ), which is a measure of the potential for release of coagulant and bubbles to a system (on a volumetric basis). The current density, defined as current through an active area of electrode, is another design parameter scale used.

Considering all the above, the pilot plant was designed, in which the wastewater passes sequentially through a pre-treatment tank, an electrochemical processing tank, a reservoir of post-treatment, which can pass to a decanter or a tank flotation.

The electrocoagulator was built in methacrylate with internal dimensions of 27.5 x 49.5 x 49.5 cm. In a first series of experiments 4 electrodes plates, 2 cathodes and 2 aluminum anodes, and 3 steel sandwich plates will be established. In the same way we have benn worked on the second line, but with iron plates. The dimensions of the aluminum plates were 250 x 500 x 1.5 mm, the iron plates of 250 x 500 x 1.0 mm and the space between electrodes of 4.75 cm. The electrodes were connected to a power source, which has a variable output between 300 V and 10 A.

All experiments done end with the successful conclusion of the application of electrocoagulation system in relation to the degree of compliance with respect to the current policy of reuse. The results guarantee the possibility of the removal process, turbidity, total suspended solids (TSS), COD, total phosphorus and phosphates, as well as the elimination of microorganisms.

These results justify the electrocoagulation can become a treatment system and water purification both in the fight against eutrophication by removing phosphates, such as improving water pre-employment form of membranes, as in improving water quality output or circulating water treatment plants along the rivers. Its simplicity, easy installation and low power consumption speaks for itself.

# INDICE





---

# INDICE

1.	PRESENTACIÓN DEL DOCTORANDO _____	3
2.	GENERALIDADES SOBRE REUTILIZACIÓN Y APLICACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN ____	11
2.1.	Justificación de la investigación _____	11
2.2.	Fundamento teóricos de la electrocoagulación _____	17
2.2.1.	Fundamento teórico del proceso de electrocoagulación _____	17
2.2.2.	Electrocoagulación, electrofloculación y electroflotación en su utilización práctica actual _____	25
2.2.3.	Electroflotación _____	31
2.2.4.	Otros usos. _____	34
2.2.5.	Desinfección electroquímica del agua. _____	35
2.2.6.	Electrosorción de microorganismos y transferencia de electrón directa _____	36
2.2.7.	Electrogeneración, in situ, de agentes de desinfección _____	37
2.2.8.	Electrogeneración de dióxido de cloro _____	39
2.3.	Conclusiones previas teóricas sobre la electrocoagulación y la electrofloculación ____	42
2.4.	Tecnologías disponibles para el desarrollo de un proceso de electrocoagulación ____	44
2.5.	Formulación del proceso _____	46
3.	OBJETIVOS INICIALES DE LA INVESTIGACIÓN _____	53
4.	INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA _____	61
4.1.	Preparación de palabras clave para la solicitud _____	61
4.1.1.	Acceso a los bancos de datos _____	62
4.2.	Investigación de la documentación recibida _____	64
4.3.	Resumen de la investigación sobre la documentación recibida _____	65
4.4.	Frontera del conocimiento _____	106
4.4.1.	Nivel de respuesta extraída de la investigación bibliográfica _____	106
4.4.2.	Tabla resumen _____	114
5.	OBJETIVOS DEFINITIVOS _____	117
6.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN _____	121

---

6.1.	Metodología analítica seguida _____	121
6.2.	Metodología de trabajo, fase 1ª _____	123
6.3.	Diseño y montaje de un reactor a escala de laboratorio, Fase 1ª _____	123
6.4.	Diseño y montaje de un reactor a escala de laboratorio, Fase 2ª _____	125
6.5.	Metodología de trabajo, montaje de la planta, 3ª fase _____	131
6.5.1.	Aparatos y equipos utilizados _____	137
6.6.	Fase experimental de la 3ª fase _____	139
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS _____	147
7.1.	Objetivos planteados a lo largo de la investigación _____	147
7.2.	Resultados obtenidos de la 1ª Fase, de “Ensayos choque” _____	150
7.2.1.	En relación con la eliminación de sulfatos y nitratos. (Objetivo F1.7) _____	150
7.2.2.	En relación con la eliminación de fósforo en fosfatos. (Objetivo F2.6) _____	151
7.2.3.	En relación con la eliminación sulfatos, nitratos, de fósforo en fosfatos, DQO, e incremento de iones de aluminio en las aguas. (Objetivos F1.7, F1.9) _____	152
7.2.4.	En relación con la eliminación de microorganismos. (Objetivo F2.7) _____	153
7.2.5.	Efecto de la separación de placas. (Objetivos 1.3 y 2.4) _____	154
7.2.6.	Influencia de los parámetros físicos (pH, conductividad) (Objetivo F1.4) _____	156
7.2.7.	Eficacia de la electrocoagulación en la eliminación de la turbidez (Objetivos F1.5 y F2.5) _____	159
7.2.8.	Eficacia de la electrocoagulación en la eliminación de DQO. (Objetivo F1.6) _____	163
7.2.9.	Eficacia de la electrocoagulación en la reducción de aniones (nitratos, sulfatos y fosfatos). (Objetivos F1.7 y F2.6) _____	166
7.2.10.	Eficacia de la electrocoagulación en la reducción de cationes. (Objetivo F1.8) _____	172
7.2.11.	Eficacia de la electrocoagulación sobre las aguas prepotables. (Objetivo F1.9) _____	183
7.3.	Resultados obtenidos de la 2ª Fase _____	186
7.3.1.	En relación con el grado de cumplimiento de los sistemas de electrocoagulación con las normativas actuales de reutilización, referentes a los parámetros fisicoquímicos como son: SS, DQO y turbidez. (Objetivos F1.10 y F2.9) _____	186
7.3.2.	Eficacia de la electrocoagulación sobre las aguas prepotables. SS, DQO y Turbidez (Objetivos 1,9 y 2.6) _____	193

---

7.3.3.	Eficacia de la electrocoagulación sobre las aguas prepotables. N, P y metales (Objetivos 1,5, 1.8 y 2.6) _____	201
7.3.4.	Referente a los parámetros microbiológicos. (Objetivo 2.7) _____	203
7.3.5.	En concordancia al rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación en relación con la modificación de la dureza del agua. (Objetivo 2.8)_	207
7.3.6.	En relación con el rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación con la modificación de la conductividad de las aguas efluentes del secundario. _____	211
7.4.	Resultados obtenidos de la 3ª Fase _____	212
7.4.1.	Experimentación de la 3ª fase _____	212
7.4.2.	Presentación y análisis de resultados _____	249
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES _____	301
8.1.	Conclusiones de los objetivos planteados _____	301
8.1.1.	Conclusidones de la 1ª FASE _____	301
8.1.2.	Conclusiones de la 2ª fase _____	309
8.1.3.	Conclusiones de la 3ª fase _____	320
8.2.	Resumen de conclusiones _____	348
8.2.1.	En relación con la generación de aluminio _____	348
8.2.2.	En relación con la temperatura _____	348
8.2.3.	En relación con el pH _____	348
8.2.4.	En relación con la DQO _____	349
8.2.5.	En relación con los sólidos en suspensión totales (SST) _____	349
8.2.6.	En relación con la turbidez _____	350
8.2.7.	En realción con el fósforo, nitrógeno y sulfatos _____	352
8.2.8.	En relación con el E. Coli y coliformes totales _____	354
8.2.9.	En relación con los metales pesados _____	356
8.2.10.	En relación con la dureza total y la dureza cálcica _____	356
8.2.11.	En relación con la conductividad eléctrica _____	356
8.2.12.	En relación con la densidad de corriente _____	357
8.2.13.	Estudio energético del proceso de electrocoagulación. _____	357
9.	OTRAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN _____	361

---



## **INDICE DE TABLAS**



# INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Asignaturas cursadas en el curso 2001-2001 _____	3
Tabla 1.2. Unidades de trabajo realizadas en los distintos años _____	6
Tabla 1.3. Idiomas _____	8
Tabla 4.1. Palabras claves para la búsqueda _____	61
Tabla 4.2. Tabla resumen de frontera de conocimiento _____	114
Tabla 7.1. Sobre eliminación de sulfatos y nitratos _____	150
Tabla 7.2. Sobre eliminación de fósforo en fosfatos _____	151
Tabla 7.3. Sobre eliminación de sulfatos, nitratos, fósforo en fosfatos, DQO, incremento Al _____	152
Tabla 7.4. Sobre eliminación de microorganismos _____	153
Tabla 7.5. Sobre influencia de la separación de placas _____	155
Tabla 7.6. Resultados del agua tratada con reactor de hierro, 2,2 cm de separación entre placas (23V) __	175
Tabla 7.7. Resultados del agua tratada con reactor de hierro, 2,2 cm de separación entre placas (31 V) __	176
Tabla 7.8. Resultados del agua tratada con reactor de hierro, 2,2 cm de separación entre placas (40 V) __	176
Tabla 7.9. Resultados del agua tratada con electrodos de Al de 2,1 cm de separación entre placas (10 V)	177
Tabla 7.10. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio, 2,1 cm de separación entre placas (23 V) _____	178
Tabla 7.11. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 2,1 cm de separación entre placas (31 V) _____	179
Tabla 7.12. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio, 2,1 cm de separación entre placas (40 V) _____	180
Tabla 7.13. Rendimientos en la eliminación de metales, atendiendo al voltaje y separación de placas ____	181
Tabla 7.13. Continuación. Rendimientos en la eliminación de metales, atendiendo al voltaje y separación de placas _____	182
Tabla 7.14. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 1,4 cm de separación entre placas (20 V) _____	187
Tabla 7.15. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 1,4 cm de separación entre placas (16 V) _____	188

---

Tabla 7.16. Resultados del agua tratada con reactor de hierro de 2,2 cm de separación entre placas. Agua del decantador primario (30 V) _____	189
Tabla 7.17. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 1,4 cm de separación entre placas (10 V) _____	191
Tabla 7.18. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 1,4 cm de separación entre placas (15 V) _____	192
Tabla 7.19. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 2,1 cm de separación entre placas (15 V) _____	193
Tabla 7.20. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 2,1 cm de separación entre placas (20 V) _____	194
Tabla 7.21. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 2,1 cm de separación entre placas (35 V) _____	194
Tabla 7.22. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 3,0 cm de separación entre placas (20 V) _____	195
Tabla 7.23. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 3,0 cm de separación entre placas (35 V) _____	196
Tabla 7.24. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 3,0 cm de separación entre placa (50 V) _____	196
Tabla 7.25. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 3,0 cm de separación entre placas (75 V) _____	197
Tabla 7.26. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 3,0 cm de separación entre placas (100 V) _____	198
Tabla 7.27. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 4,7 cm de separación entre placas (75 V) _____	198
Tabla 7.28. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 4,7 cm de separación entre placas (100 V) _____	199
Tabla 7.29. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 4,7 cm de separación entre placas (150 V) _____	199
Tabla 7.30. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas __	201
Tabla 7.31. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas. _	202



---

Tabla 7.32. Resultados de eliminación de microorganismos, con electrodos de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas _____	203
Tabla 7.33. Resultados de eliminación de microorganismos, con electrodos de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas _____	204
Tabla 7.34. Resultados del agua tratada con reactor de hierro de 2,2 cm de separación entre placas _____	205
Tabla 7.35. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas _____	206
Tabla 7.36. Resultados obtenidos con placas de aluminio en batch _____	208
Tabla 7.37. Resultados obtenidos con placas de hierro en batch _____	208
Tabla 7.38. Resultados obtenidos con placas de aluminio a 10 y 12 V. _____	209
Tabla 7.39. Resultados obtenidos con placas de hierro para la reducción de dureza con 10 V _____	210
Tabla 7.40. Resultados obtenidos con placas de hierro para la reducción de dureza con 14 V _____	210
Tabla 7.41. Resultados de la variación de la densidad de corriente ( $A/m^2$ ) a diferente conductividad eléctrica, respecto al voltaje aplicado. _____	211
Tabla 7.42. Resultados obtenidos con placas de aluminio con la celda nº 2 _____	215
Tabla 7.43. Resultados obtenidos con placas de acero con la celda nº 1 _____	216
Tabla 7.44. Resultados obtenidos con placas de aluminio con la celda nº 2 _____	217
Tabla 7.45. Resultados obtendidos de parámetros microbiológicos con placas de aluminio con la celda nº2 _____	217
Tabla 7.46. Resultados obtenidos con placas de aluminio _____	218
Tabla 7.47. Resultados obtenidos con placas de acero _____	219
Tabla 7.48. Resultados obtenidos con celda de aluminio _____	220
Tabla 7.49. Resultados obtendidos de parámetros microbiológicos con celda de aluminio _____	220
Tabla 7.50. Resultados obtenidos con celda de acero _____	221
Tabla 7.51. Resultados obtendidos de parámetros microbiológicos con celda de acero _____	221
Tabla 7.52. Resultados obtenidos con electrodos de aluminio _____	221
Tabla 7.53. Resultados obtendidos de parámetros microbiológicos con electrodos de aluminio _____	222
Tabla 7.54. Resultados obtenidos con electrodos de acero _____	222
Tabla 7.55. Resultados obtendidos de parámetros microbiológicos con electrodos de acero _____	222

---

---

Tabla 7.56. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 5 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,71 y 4,76 cm _____	223
Tabla 7.57. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de aluminio _____	223
Tabla 7.58. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 5 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,73 y 4,76 cm _____	224
Tabla 7.59. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de aluminio _____	224
Tabla 7.60. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 5 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,60 y 4,84 cm _____	225
Tabla 7.61. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de aluminio _____	225
Tabla 7.62. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 5 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,71 y 4,74 cm _____	226
Tabla 7.63. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de hierro _____	226
Tabla 7.64. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 5 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,53 y 4,77 cm _____	227
Tabla 7.65. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de hierro _____	227
Tabla 7.66. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 5 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,43 y 4,65 cm _____	228
Tabla 7.67. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de aluminio _____	228
Tabla 7.68. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 5 A el inicio _____	229
Tabla 7.69. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de aluminio _____	229
Tabla 7.70. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 5 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,53 y 4,77 cm _____	230
Tabla 7.71. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de hierro _____	230
Tabla 7.72. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 3 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,61 y 4,83 cm _____	231
Tabla 7.73. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de hierro _____	232
Tabla 7.74. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 3 A el inicio _____	232
Tabla 7.75. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de aluminio _____	232
Tabla 7.76. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 3 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,77, 5,1 y 4,86 cm _____	233

---

---

Tabla 7.77. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 3 A el inicio _____	234
Tabla 7.78. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 3 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,67, 4,96 y 4,73 cm _____	235
Tabla 7.79. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de hierro _____	235
Tabla 7.80. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 3 A el inicio _____	236
Tabla 7.81. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de aluminio _____	236
Tabla 7.82. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 7 A el inicio _____	237
Tabla 7.83. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 7 A el inicio _____	238
Tabla 7.84. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 0,98 A el inicio _____	239
Tabla 7.85. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 0,98 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,60 y 4,77 cm _____	240
Tabla 7.86. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 7 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,79 y 4,77 cm _____	241
Tabla 7.87. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 7 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,67 y 4,78 cm _____	242
Tabla 7.88. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de hierro _____	242
Tabla 7.89. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 9 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,65 y 4,80 cm _____	243
Tabla 7.90. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 9 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,72 y 5,16 cm _____	244
Tabla 7.91. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de aluminio _____	244
Tabla 7.92. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 9 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,77 y 4,77 cm _____	245
Tabla 7.93. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 9 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,72 y 4,78 cm _____	246
Tabla 7.94. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de hierro _____	246
Tabla 7.95. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 9 A sin placa intermedia en el inicio y con distancia entre electrodos de 4,64 y 4,63 cm _____	247
Tabla 7.96. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 9 A sin placa intermedia en el inicio y con distancia entre electrodos de 4,50 y 4,55 cm _____	248

---

---

Tabla 7.97. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de hierro _____	248
Tabla 7.98. Rendimiento de eliminación (%) usando electrodos de Al con placa intermedia. _____	249
Tabla 7.99. Rendimiento de eliminación (%) usando electrodos de Al con placa intermedia. _____	251
Tabla 7.100. Rendimiento de eliminación (%) usando electrodos de Fe con placa intermedia. _____	253
Tabla 7.101. Resultados promedios de Coliformes totales en el agua de entrada y a la salida de las celdas de aluminio y la de hierro. _____	258
Tabla 7.102. Resultados promedios de E. Coli en el agua de entrada y a la salida de la celda de aluminio y la de hierro. _____	259
Tabla 7.103. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de Aluminio a 9 A y 58 V _____	260
Tabla 7.104. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de hierro 9 A y 56 V. _____	260
Tabla 7.105. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio 7 A y 54 V. _____	260
Tabla 7.106. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de hierro 7 A y 48 V. _____	260
Tabla 7.107. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio 5 A y 45 V. _____	260
Tabla 7.108. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de hierro 5 A y 40 V. _____	260
Tabla 7.109. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio 3 A y 27 V. _____	261
Tabla 7.110. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de hierro 3 A y 23 V. _____	261
Tabla 7.111. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio 1 A y 8 V. _____	261
Tabla 7.112. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de hierro 1 A y 7 V. _____	261
Tabla 7.113. Características de los ensayos _____	262
Tabla 7.114. Rendimientos de eliminación obtenidos trabajando con electrodos de aluminio sin placa intermedia. _____	263
Tabla 7.115. Rendimientos de eliminación obtenidos trabajando con electrodos de hierro sin placa intermedia. _____	265
Tabla 7.116. Resultados promedios de Coliformes totales en el agua de entrada y a la salida de la celda de aluminio y la de hierro sin placa intermedia. _____	269
Tabla 7.117. Resultados promedios de E. Coli en el agua de entrada y a la salida de la celda de aluminio y la de hierro sin placa intermedia. _____	270
Tabla 7.118. Resultados, trabajando con electrodos de aluminio sin placa intermedia a 9 A y 58 V. _____	271
Tabla 7.119. Resultados, trabajando con electrodos de hierro sin placa intermedia a 9 A y 53 V. _____	271

---

---

Tabla 7.120. Resultados, trabajando con electrodos de aluminio sin placa intermedia a 7 A y 53 V _____	271
Tabla 7.121. Resultados, trabajando con electrodos de hierro sin placa intermedia a 7 A y 46 V _____	271
Tabla 7.122. Resultados, trabajando con electrodos de aluminio sin placa intermedia a 5 A y 33 V _____	271
Tabla 7.123. Resultados, trabajando con electrodos de hierro sin placa intermedia a 5 A y 30 V _____	271
Tabla 7.124. Resultados, trabajando con electrodos de aluminio sin placa intermedia a 3 A y 21 V _____	271
Tabla 7.125. Resultados, trabajando con electrodos de hierro sin placa intermedia a 3 A y 19 V _____	272
Tabla 7.126. Resultados, trabajando con electrodos de aluminio sin placa intermedia a 1 A y 9 V _____	272
Tabla 7.127. Resultados, trabajando con electrodos de hierro sin placa intermedia a 1 A y 7 V _____	272
Tabla 7.128. Características de los ensayos _____	273
Tabla 7.129. Rendimientos de eliminación obtenidos trabajando con electrodos de aluminio-grafito _____	274
Tabla 7.130. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de hierro-grafito _____	276
Tabla 7.131. Resultados promedios de Coliformes totales en el agua de entrada y a la salida de la celda de aluminio-grafito y la de hierro-grafito. _____	279
Tabla 7.132. Resultados promedios de E. Coli en el agua de entrada y a la salida de la celda de aluminio-grafito y la de hierro-grafito. _____	280
Tabla 7.133. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio-grafito 58 V _____	280
Tabla 7.134. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de hierro-grafito 58 V _____	281
Tabla 7.135. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio-grafito 38 V _____	281
Tabla 7.136. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de hierro-grafito 38 V _____	281
Tabla 7.137. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio-grafito 20 V _____	281
Tabla 7.138. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de hierro-grafito 20 V _____	281
Tabla 7.139. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio-grafito 10 V _____	281
Tabla 7.140. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de hierro-grafito 10 V _____	281
Tabla 7.141. Resultados obtenidos en la reducción de la dureza, trabajando con electrodos aluminio y hierro con placa intermedio entre electrodos. _____	283
Tabla 7.142. Resultados obtenidos en la reducción de la dureza, trabajando con electrodos aluminio y hierro sin placa intermedia entre electrodos. _____	284
Tabla 7.143. Resultados obtenidos en la reducción de la dureza, trabajando con electrodos aluminio-grafito y hierro-grafito. _____	285

---

Tabla 7.144. Resultados obtenidos en la reducción de la dureza, trabajando con electrodos aluminio y hierro, modificando la conductividad del agua de entrada a las celdas. _____	286
Tabla 7.145. Resultados obtenidos en la reducción de la DQO, SS, P-total, N-total, y turbidez, trabajando con electrodos de aluminio, modificando la conductividad del agua de entrada a las celdas. _____	287
Tabla 7.146. Modificación de la conductividad y el voltaje en la celda con electrodos de aluminio. _____	288
Tabla 7.147. Resultados obtenidos en la reducción de la DQO, SS, P-total, N-total, turbidez, trabajando con electrodos de hierro, modificando la conductividad del agua de entrada a las celdas. _____	290
Tabla 7.148. Modificación de la conductividad y el voltaje en la celda con electrodos de hierro. _____	291
Tabla 7.149. Resultados promedios de Coliformes totales y E. Coli en el agua de entrada y a la salida de la celda de aluminio, adicionando NaCl como electrolito. _____	292
Tabla 7.150. Resultados promedios de Coliformes totales y E. Coli en el agua de entrada y a la salida de la celda de hierro, adicionando NaCl como electrolito. _____	293

## **INDICE DE FIGURAS**





## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Proceso de oxidación-reducción	21
Figura 2.2. a) reacción electroquímica previa, b) establecimiento del gradiente de concentración.	21
Figura 2.3. Reacciones electroquímicas a) en presencia de un ácido fuerte, b) en presencia de un ácido débil (HB), c) en ausencia de ácidos y bases.	23
Figura 2.4. Reacción electroquímica de oxidación de Red: a) con liberación de $H^+$ , b) en presencia de una base débil, c) en presencia de una base fuerte.	24
Figura 2.5. Proceso de floculación-coagulación	26
Figura 2.6. Construcción de una celda de electroflotación	32
Figura 2.7. Producción y reacciones de $Cl_2$ basados en desinfectantes tales como el $ClO_2$	38
Figura 2.8. Producción y reacción de $ClO_2$ . Las ecuaciones son representativas y no están balanceadas	40
Figura 2.9: Desinfección vs cloro libre residual	41
Figura 6.1. Dispositivo experimental de electrocoagulación de aguas	124
Fig.6.2. Fuente de alimentación, celdas de aluminio y multímetro electrónico	125
Fig. 6.3. Lugar de toma de muestra en el Manzanares, aguas debajo de la depuradora La China	126
Figura 6.4. Línea de la planta piloto	130
Figura 6.5. Vista general de la planta	132
Figura 6.6. Vista parcial de la planta piloto de electrocoagulación	133
Figura 6.7. Vista parcial de la zona de dosificación	134
Figura 6.8. Vista de los tanques de alimentación y los electrocoaguladores	135
Figura 6.9. Vista del electrocoagulador	136
Figura 6.10. Vista del decantador y flotador	137
Figura 6.11. Fuentes de alimentación	138
Figura 6.12. Pantalla multiparamétrica	139
Fig. 6.13. Reactor con placa intermedia	140
Figura 7.1. Representación de la densidad de corriente obtenida en función del voltaje y la separación de placas en la electrocoagulación.	154

---

Figura 7.2. Densidad de corriente en función de la separación de las placas del electrocoagulador, a voltaje constante.	154
Figura 7.3. Agua clarificada procedente de la celda de aluminio	157
Figura 7.4. Efluente procedente del electrocoagulador de hierro. El primero a los 3 minutos de decantación y los segundos a los 30 minutos de decantación	158
Figura 7.5. Eliminación de turbidez con electrodos de aluminio y hierro, con placa intermedia	159
Figura 7.6. Eliminación de turbidez con electrodos de aluminio y hierro, sin placa intermedia	161
Figura 7.7. Eliminación de turbidez con ánodo de aluminio o hierro y cátodo de grafito, sin placa intermedia	162
Figura 7.8. Sobre eliminación de la DQO, con electrodos de aluminio o hierro, y placa intermedia	163
Figura 7.9. Sobre eliminación de la DQO, con electrodos de aluminio o hierro y sin placa intermedia	164
Figura 7.10. Sobre eliminación de la DQO, con ánodo de aluminio o hierro y cátodo de grafito, y sin placa intermedia	165
Figura 7.11. Sobre eliminación de sulfatos a distintos voltajes (3, 12, 35 V)	166
Figura 7.12. Sobre eliminación de sulfatos a distintos voltajes (10, 15 V)	167
Figura 7.13. Sobre eliminación de sulfatos a distintos voltajes (10, 31, 40 V)	167
Figura 7.14. Sobre eliminación de nitratos a distintos voltajes (3, 12, 35 V)	168
Figura 7.15. Sobre eliminación de nitratos a distintos voltajes (10, 15 V)	168
Figura 7.16. Sobre eliminación de nitratos a distintos voltajes (10,31,40 V)	169
Figura 7.17. Sobre eliminación de fosfatos a distintos voltajes (12, 35 V)	170
Figura 7.18. Sobre eliminación de fosfatos a distintos voltajes (10, 15 V)	170
Figura 7.19. Sobre eliminación de nitratos a distintos voltajes (10, 31, 40 V)	171
Figura 7.20. Sobre eliminación de sulfatos, nitratos y fosfatos, a distintos tiempos de retención	171
Figura 7.21. Porcentaje de eliminación de metales con electrodos de Al de 3,1 cm de separación entre placas (10 V)	173
Figura 7.22. Porcentaje de eliminación de metales con electrodos de Al de 3,1 cm de separación entre placas (15 V)	173
Figura 7.23. Porcentaje de eliminación de metales con electrodos de Fe de 2,2 cm de separación entre placas (10 V)	174

---

Figura 7.24. Porcentaje de eliminación de metales con electrodos de Fe de 2,2 cm de separación entre placas (23 V) _____	175
Figura 7.25. Porcentaje de eliminación de metales con electrodos de hierro de 2,2 cm de separación entre placas (31 V) _____	176
Figura 7.26. Porcentaje de eliminación de metales con electrodos de hierro de 2,2 cm de separación entre placas (40 V) _____	177
Figura 7.27. Porcentaje de eliminación de metales con electrodos de Al de 2,1 cm de separación entre placas (10 V) _____	178
Figura 7.28. Porcentaje de eliminación de metales con electrodos de Al de 2,1 cm de separación entre placas (23 V) _____	179
Figura 7.29. Porcentaje de eliminación de metales con electrodos de Al de 2,1 cm de separación entre placas (31 V) _____	180
Figura 7.30. Porcentaje de eliminación de metales con electrodos de Al de 2,1 cm de separación entre placas (40 V) _____	181
Figura 7.31. Eliminación de la DQO, SS, Turbidez con electrodos de Aluminio a 10 V _____	184
Figura 7.32. Eliminación de la DQO, SS, Turbidez con electrodos de Aluminio a 15 V _____	185
Figura 7.33. Eliminación de la DQO, SS, Turbidez con electrodos de Al a 10 V _____	186
Figura 7.34. Eliminación de la DQO, SS y la turbidez a 20 V _____	188
Figura 7.35. Eliminación de la DQO, SS, Turbidez con electrodos de Al a 16 V. _____	189
Figura 7.36. Eliminación de la DQO, SS, Turbidez con electrodos de Fe a 30 V _____	190
Figura 7.37. Eliminación de la DQO, SS, Turbidez con electrodos de Aluminio a 10 V _____	191
Figura 7.38. Eliminación de la DQO, SS, Turbidez con electrodos de Aluminio a 15 V _____	192
Figura 7.39. Eliminación de la DQO, SS, Turbidez con electrodos de Al a 75 V, y de 3,0 cm de separación entre placas. _____	197
Figura 7.40. Eliminación de la DQO, SS, Turbidez con electrodos de Al a 150 V, y 4,7 cm de separación entre placas. _____	200
Figura 7.41. Variación de temperatura, pH y eliminación de nitrógeno con electrodos de Al, con 3,1 cm de separación entre placas. _____	202
Figura 7.42. Porcentaje de eliminación de metales y fósforo con electrodos de Al de 3,1 cm de separación entre placas _____	203

---

---

Figura 7.43. Eliminación de microorganismos con electrodos de aluminio. _____	204
Figura 7.44. Eliminación de microorganismos con electrodos de aluminio _____	205
Figura 7.45. Eliminación de microorganismos con electrodos de hierro _____	206
Figura 7.46. Eliminación de microorganismos con electrodos de aluminio _____	207
Figura 7.47. Comparación de la variación de la alcalinidad, durezas total y cálcica con electrodos de aluminio y hierro _____	208
Figura 7.48. Comparación de la variación de la alcalinidad, durezas total y cálcica con electrodos de aluminio a 10 y 12 V. _____	209
Figura 7.49. Variación porcentual de la conductividad, alcalinidad, dureza total utilizando electrodos de hierro a 10 y 14 V. _____	210
Figura 7.50. Variación de la densidad de corriente en función de la variación del voltaje y conductividad eléctrica _____	212
Figura 7.51. Rendimiento de eliminación de contaminantes a diferentes intensidades de corriente _____	249
Figura 7.52. Rendimiento promedio de eliminación de contaminantes a diferentes intensidades de corriente. _____	253
Figura 7.53. Comparación de eliminación de la DQO con electrodos de aluminio y hierro _____	256
Figura 7.54. Comparación de eliminación de SST y turbidez con electrodos de aluminio y hierro _____	257
Figura 7.55. Comparación de eliminación del P-total y N-total con electrodos de aluminio y hierro _____	257
Figura 7.56. Eliminación de coliformes T., con electrodos de aluminio y hierro _____	258
Figura 7.57. Eliminación de E. Coli, con electrodos de aluminio y hierro _____	259
Figura 7.58. Eliminación de la DQO, P-total, N-total, SS, y Turbidez con electrodos de aluminio _____	263
Figura 7.59. Eliminación de la DQO, P-total, N-total, SS, y Turbidez, con electrodos de hierro sin placa intermedia. _____	266
Figura 7.60. Comparación de eliminación de la DQO entre electrodos de Fe y Al. _____	267
Figura 7.61. Comparación de eliminación de los SST y de la turbidez entre electrodos de Fe y Al. _____	268
Figura 7.62. Comparación de eliminación del P-total y N-total entre electrodos de Fe y Al. _____	268
Figura 7.63. Eliminación de coliformes T., con electrodos de aluminio y hierro _____	269
Figura 7.64. Eliminación de E. Coli, con electrodos de aluminio y hierro _____	270
Figura 7.65. Eliminación de la DQO, P-total, N-total, SS, y Turbidez, con electrodos de aluminio-grafito. _____	274

---

Figura 7.66. Eliminación de la DQO, P-total, N-total, SS, y Turbidez, con electrodos de hierro-grafito. ____	276
Figura 7.67. Comparación de eliminación de la DQO entre electrodos de hierro-grafito y aluminio-grafito. _____	277
Figura 7.68. Comparación de eliminación de la DQO entre electrodos de hierro-grafito y aluminio-grafito. _____	277
Figura 7.69. Eliminación de Coliformes totales, con electrodos de Al-grafito y Fe-grafito _____	279
Figura 7.70. Eliminación de E. Coli, con electrodos de Al-grafito y Fe-grafito _____	280
Figura 7.71. Comparación de la variación de la dureza total y cálcica con electrodos de aluminio y hierro con placa intermedia entre electrodos _____	283
Figura 7.72. Comparación de la variación de las durezas total y cálcica con electrodos de aluminio y hierro _____	284
Figura 7.73. Comparación de la variación de las durezas total y cálcica con electrodos de aluminio-grafito y hierro-grafito. _____	285
Figura 7.74. Comparación de la variación de las durezas total y cálcica con electrodos de aluminio y hierro, modificando la conductividad del agua de entrada a las celdas. _____	286
Figura 7.75. Rendimiento en la eliminación de la DQO, SS, P-total, N-total, y turbidez en función de la concentración de NaCl, con electrodos de aluminio. _____	288
Figura 7.76. Variación de la conductividad y el voltaje en la celda con electrodos de aluminio _____	289
Figura 7.77. Rendimiento en la eliminación de la DQO, SS, P-total, N-total, y turbidez en función de la concentración de NaCl y el voltaje, con electrodos de hierro. _____	290
Figura 7.78. Variación de la conductividad y el voltaje en la celda con electrodos de hierro _____	291
Figura 7.79. Cantidad logarítmica de Coliformes totales y E. Coli en función del voltaje y concentración NaCl, tanto en el agua de entrada como a la salida de la celda de aluminio. _____	292
Figura 7.80. Cantidad logarítmica de Coliformes totales y E. Coli en función del voltaje y concentración NaCl, tanto en el agua de entrada como a la salida de la celda de hierro. _____	293
Figuras 7.81. Consumo de energía sobre la DQO eliminada en función de la intensidad, con electrodos de aluminio y hierro con placas intermedias. _____	295
Figura 7.82. Consumo de energía sobre la DQO eliminada en función de la intensidad, con electrodos de hierro y aluminio sin placa intermedia. _____	296
Figura 7.83. Consumo de energía sobre la DQO eliminada en función de la intensidad, con electrodos de hierro-grafito y aluminio-grafito. _____	296

---

Figura 7.84. Consumo de energía sobre la DQO eliminada en función de la concentración de NaCl (mg/l), trabajando a una intensidad de corriente de 9 A. _____	297
Figura 7.85. Consumo de energía sobre la DQO eliminada en función de la intensidad, con electrodos de hierro-grafito y aluminio-grafito. _____	298
Figura 7.86. Consumo de energía sobre la DQO eliminada en función de la concentración de NaCl (mg/l), trabajando a una intensidad de corriente de 9 A. _____	298
Figura 8.1. Representación de la densidad de corriente obtenida en función del voltaje y la separación de placas en la electrocoagulación. _____	302
Figura 8.2. Densidad de corriente en función de la separación de las placas del electrocoagulador, a voltaje constante. _____	303
Figura 8.3. Fuente de alimentación, celdas de aluminio y multímetro electrónico. _____	309
Figura 8.4. Representación de la densidad de corriente obtenida en función del voltaje y la separación de placas en la electrocoagulación. _____	318
Figura 8.5. Consumo de energía sobre la DQO eliminada en función de la intensidad, con electrodos de hierro-grafito y aluminio-grafito. _____	347
Figura 8.6. Consumo de energía sobre la DQO eliminada en función de la concentración de NaCl (mg/l), trabajando a una intensidad de corriente de 9 A. _____	347

## **CAP. 1. PRESENTACIÓN DEL DOCTORANDO**







## **1. PRESENTACIÓN DEL DOCTORANDO**

Mi nombre es Pablo Santiago Hernández Lehmann con DNI nº **50847358-Q**. Nací el **8 de junio** del año **1971**. Cursé mis estudios previos a los universitarios en el colegio del Pilar de Madrid, en el Blackrock College de Dublín, Kloster Ettal en Baviera y en el Montana Institut Zugerberg de Zurich.

Desarrollé mis estudios universitarios en la Escuela Técnica de Ingenieros de Canales y Puertos de Madrid, terminando mis estudios en el año 2001. Continué mis estudios con el Doctorado en la misma Escuela.

En el curso académico 2001-2002 cursé las siguientes asignaturas, obteniendo las calificaciones que se enumeran a continuación:

<b>Asignatura</b>	<b>Créditos</b>	<b>Calificación</b>
Residuos Sólidos Urbanos; disposición, eliminación y recuperación	6	8 NOTABLE
Recuperación de suelos	3	9 SOBRESALIENTE
Desinfección en la reutilización de las aguas y lodos	6	9 SOBRESALIENTE
Procesos de depuración de aguas residuales industriales	6	8 NOTABLE

*Tabla 1.1. Asignaturas cursadas en el curso 2001-2001*

En el curso 2002-2003 desarrollé el trabajo de iniciación a la investigación “La utilización de aguas pluviales para satisfacer demandas de agua no potable”, con el que obtuve la suficiencia investigadora con una calificación de sobresaliente. En 2003 obtuve el DEA.

El trabajo fue dirigido y tutelado por D. Aurelio Hernández Muñoz, Catedrático de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid.

Con fecha 13 de junio de 2005 solicité como título de tesis doctoral “Investigación sobre procesos avanzados de tratamiento y depuración de las aguas mediante electrocoagulación”, proponiendo como director a D. Aurelio Hernández Muñoz y tutor de la misma a D. Manuel Gil Rodríguez.

En la reunión celebrada por la Comisión de Doctorado del Departamento de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Medio Ambiente, el día 19 de julio de 2005, fue aceptado el título “Investigación sobre procesos avanzados de tratamiento y depuración de las aguas mediante electrocoagulación”, así mismo quedó registrado en la Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos con fecha 20 de julio de 2005. En esta misma Comisión quedó nombrado Director de la Tesis el Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos D. Aurelio Hernández Muñoz.

Los objetivos, en aquel momento, eran los de contribuir al conocimiento científico de algún nuevo proceso en relación con el tratamiento y depuración de las aguas. Así apareció el sistema de electrocoagulación.

La electrocoagulación es una técnica de separación de materias, muy favorable para el tratamiento de aguas prepotables y para depuración de las aguas residuales, permitiendo el ahorro de productos químicos, obteniéndose resultados importantes en la eliminación de parámetros no deseados dentro de las aguas.

La electrocoagulación de las aguas era fundamentalmente, en aquel momento, una técnica que usa la corriente eléctrica, ya sea continua, alterna o pulsante, para separar metales pesados, desestabilizar partículas sólidas en suspensión coloidal y destruir sustancias tóxicas por oxidación anódica, así como reducir la contaminación bacteriana.

La electrocoagulación aplicada a aguas brutas consigue en consecuencia eliminar contaminantes, mediante procesos físicos, químicos y biológicos.

Esta técnica se presume como útil en:

- El acondicionamiento del agua previo a su paso a los procesos de desalación por ósmosis, permitiendo alcanzar mejores rendimientos y evitar colmataciones indeseadas.
- El tratamiento previo a la coagulación en el tratamiento de las aguas prepotables, evitando consumos importantes de productos químicos como son los coagulantes y floculantes.

- El tratamiento terciario en la eliminación de nutrientes.
- El tratamiento terciario de aguas residuales para su reutilización, ya que se evita la incorporación de reactivos y se mejoran las condiciones de sedimentabilidad.

La redacción de la tesis ha presentado un ritmo lento, dada la necesidad de atender mis compromisos familiares y profesionales.

En el año 2008, prácticamente se dio respuesta a los objetivos previstos, y fue posible presentarla, pero por indicaciones del Director de la tesis se procedió a la construcción de una planta, casi a nivel industrial, para dar respuesta más concreta a alguno de los objetivos planteados. Así se contemplan dos fases diferenciadas experimentales.

#### VIDA LABORAL

---

- *Desde abril de 1999 Fundador y Director Gerente de INNOVACIÓN CIVIL ESPAÑOLA, S.L. empresa consultora de ingeniería Civil especializada en:*
  - *Proyectos de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales domésticas e industriales.(I)*
  - *Proyectos de Estaciones de Tratamiento de Agua Potable.(II)*
  - *Proyectos de redes de Abastecimiento y Saneamiento.(III)*
  - *Planes Directores de Abastecimiento y Saneamiento.(IV)*
  - *Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos y Tóxicos y Peligrosos.(V)*
  - *Estudios de Impactos Ambientales.(VI)*
  - *Asistencias técnicas a direcciones de obra.(VII)*
  - *Otros.(VIII)*

Año	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Total
2000	4							3	7
2001	17	1	1					39	58
2002	17	1						2	20
2003	14	2	4					8	28
2004	35		4	1		1		8	49
2005	72	2	9			9	3	7	102
2006	29	8	4				1	2	44
2007	34	5	7				3	11	60
2008	21	5		2		1	1	23	53
2009	27	10	2				3	16	58
2010	23	8	3	1	1	1	4	18	59

Tabla 1.2. Unidades de trabajo realizadas en los distintos años

En septiembre de 2009 abrí una filial de la empresa en Brasil, Natal en Rio Grande do Norte y en diciembre del mismo año me asocié con una importante ingeniería de Sao Paulo.

En octubre de 2010 abrí una filial de la empresa en el Perú, Lima.

#### PREMIOS

- Junio 2000. Segundo Accésit en la convocatoria 2000 de los Premios Uralita Obra Civil por el estudio sobre la posible "Reutilización de agua en complejos de hostelería"
- Octubre 1998. Primer Accésit con el lema S-DOS. en el Concurso de Anteproyecto de Edificio Dotacional en la "Antigua Estación de Autobuses", convocado por la Empresa Municipal Estación Sur de Autobuses, S.A. del Excmo. Ayuntamiento de Madrid, la Fundación COAM y la Demarcación de Madrid del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

#### BECAS

- 1999. Beca de la OTT (Oficina de Transferencia de Tecnología) para Investigación y Localización de la información hidrológica y ambiental sobre el río Carrión.
- 1997-1999. Diversas colaboraciones con Beca de la Fundación Agustín de Betancourt de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid en los diversos proyectos descritos.

Procesos avanzados de tratamiento y depuración de las aguas mediante electrocoagulación

- 1998. XVI Jornadas sobre los estudios del mar por Asemar. Asociación de Estudios de Mar en el Ferrol.

#### ACTIVIDAD DOCENTE

---

- Desde 2003 Profesor Honorario en la Universidad Politécnica de Madrid; Escuela Politécnica de Enseñanza Superior; Licenciatura en Ciencias Ambientales en la Asignatura de Bases para la Evaluación de Impacto Ambiental.
- 2004 Profesor en el XVIII Master en Contaminación Ambiental dirigido desde la Universidad Politécnica de Madrid; Impartido en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Desde 2007 Profesor en el Master en Medio Ambiente y Arquitectura Bioclimática. Módulo 11 Contaminación de las Aguas dirigido desde la Universidad Politécnica de Madrid; Impartido en la Escuela Técnica Superior de Arquitectos.
- Desde 2009 Profesor en el Master en Medio Ambiente y Arquitectura Bioclimática. Contaminación de las Aguas, dirigido desde la Universidad Politécnica de Valencia; impartido en la Escuela Técnica Superior de Arquitectos.
- Desde 2010 Profesor en el Master en Medio Ambiente y Arquitectura Bioclimática. Contaminación de las Aguas, dirigido desde la Universidad Politécnica de Alicante; impartido en la Escuela Técnica Superior de Arquitectos.

#### CONFERENCIAS IMPARTIDAS

---

- Mayo 2004. Exposición en Huatulco
- Julio 2000. Necesidades de Planificación en la implantación del saneamiento de la Ciudad de Panamá. Invitado por la Alcaldía de la ciudad de Panamá.
- Mayo 2000. Construcción de un Edificio Singular. La Piovera Azul; edificación inteligente. En la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

IDIOMAS

---

**Idiomas (R = regular, B = bien, C = correctamente)**

Idioma	Habla	Lee	Escribe
INGLES	C	C	C
ALEMAN	B	C	C
PORTUGUÉS	R	B	R
FRANCES	B	C	C

*Tabla 1.3. Idiomas*

LOCALIZACIÓN

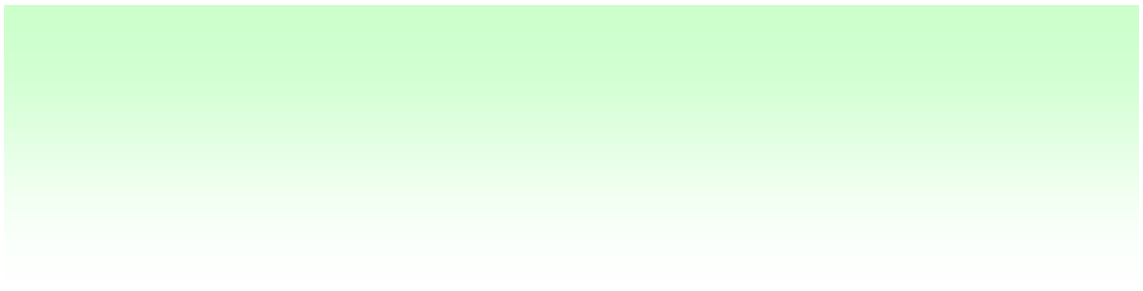
---

Teléfono: **915 241 592**

Fax: **915 217 965**

Correo electrónico: **inncive@inncive.es**

## **CAP. 2. GENERALIDADES SOBRE REUTILIZACIÓN Y APLICACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN**







## **2. GENERALIDADES SOBRE REUTILIZACIÓN Y APLICACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN**

### **2.1. Justificación de la investigación**

En muchos municipios de España existe un fuerte déficit hídrico, de carácter permanente, que se produce como consecuencia del desequilibrio entre disponibilidades de agua y demandas medias. Este déficit se agrava coyunturalmente en épocas de sequía y en las épocas de veraneo, cuando coinciden la menor precipitación y el mayor consumo como consecuencia de la afluencia masiva de turistas.

Son muchas las investigaciones realizadas en diferentes países y por el propio Grupo de Investigación de la UPM "Tratamiento y gestión sostenible de los recursos" perteneciente al Departamento de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Medio Ambiente de la ETS Caminos, encaminadas al estudio de diferentes tecnologías de tratamientos terciarios de las aguas de escorrentía superficial, aguas de lluvia, y de las aguas grises generadas en las viviendas, aguas de duchas y baños, con el objeto final de reutilizar éstas aguas con fines públicos (riegos de jardines, limpieza viaria, ..) y privados (riegos de campos de golf, jardines, uso sanitario en hoteles, etc.), así como a la reutilización de las aguas negras.

Las actuales instalaciones de tratamiento, diseñadas para la reutilización, suelen ajustarse, entre otras, a una de las siguientes líneas de proceso:

#### Tipo 1

- Cámara de mezcla y floculación
- Decantación lamelar
- Filtración convencional a presión
- Desinfección con UV

#### Tipo 2

- Cámara de mezcla y floculación

- Decantación o flotación
- Filtración convencional
- Desinfección con ozono

#### Tipo 3

- Cámara de mezcla y floculación
- Decantación o flotación
- Filtración convencional
- Filtración por membranas de microfiltración, ultrafiltración y/o nanofiltración

#### Tipo 4

- Cámara de mezcla y floculación
- Decantación o flotación
- Filtración convencional
- Filtración por membranas de osmosis

#### Tipo 5

- Cámara de mezcla y floculación
- Filtración convencional
- Filtración por membranas

#### Tipo 6

- Filtración convencional o filtros de anillas
- Filtración por membranas

El importante desarrollo de las tecnologías de membrana, durante los últimos años, ha convertido este tipo de soluciones en una de las posibilidades más interesantes en el campo de la reutilización, siendo también varias las investigaciones desarrolladas. Son muchos los trabajos de investigación que se están desarrollando en estos últimos años sobre estas tecnologías, existiendo ya, en España y algunos países de nuestro entorno, realizaciones concretas a escala real.

Hasta ahora las tecnologías de electrocoagulación y electroflotación no han recibido una especial atención dentro del ámbito de la reutilización, y sin embargo, investigaciones realizadas hasta la

fecha en otros sectores relacionados (tratamientos en prepotables o tratamientos de efluentes industriales), permite suponer que la aplicación de esta nueva tecnología al ámbito de la reutilización de efluentes depurados puede proporcionar excelentes resultados.

Actualmente se dispone de poca información relacionada con los tratamientos terciarios con fines de reutilización mediante esta tecnología. Pueden citarse como investigaciones significativas las siguientes:

- Chuanping Feng, Norio Sugiura, Satoru Shimada, Takaaki Maekawa, (2005) "*Development of a high performance electrochemical wastewater treatment system*". Journal of Hazardous Materials B 113, 65-78:

Para formular un sistema electroquímico de máximo rendimiento para uso práctico en el tratamiento de aguas residual e industrial, fueron llevados a cabo experimentos de proceso electroquímico a nivel de laboratorio, con aguas residuales municipales. En base a los resultados obtenidos a nivel de laboratorio, se implementó un sistema de tratamiento electroquímico a escala piloto de 0,3 m<sup>3</sup>/h, usando los procesos de electrocoagulación. El rendimiento del sistema se evaluó tratando aguas residuales domésticas, aguas de lagunas conteniendo algas, aguas residuales de purines. Se utilizaron ánodos de Ti/RuO<sub>2</sub> – TiO<sub>2</sub> y con ánodos de platino. La eliminación de SS, N- total, P- total, NH<sub>4</sub>-N y DQO de las aguas residuales domésticas y agua de laguna conteniendo algas fue del 90%, mientras que la eliminación de clorofila A de las algas fue del 100%.

- Kerwick M. I., Reddy S. M., Chamberlain A. H. L., Holt D. M. (2005). "*Electrochemical disinfection, an environmental acceptable method of drinking water disinfection*". Electrochimica Acta 50, 5270-5277.

En este trabajo se muestran estudios y experiencias sobre el uso de la desinfección electroquímica como alternativa a la desinfección con cloro. Las experiencias de desinfección electroquímica demostraron ser efectivas sobre *Clostridium perfringens*, *Escherichia coli* y *Cryptosporidium parvum*.

En el trabajo se describe el equipo utilizado, consistente en una celda electroquímica tipo Zappi con ánodos de platino-niobio y cátodos de acero inoxidable. Las conclusiones de este trabajo son que la desinfección electroquímica es la más efectiva para aguas que contengan

cloruros, que la reducción de E. coli y el bacteriofago MS2 en la desinfección electroquímica es de cuatro potencias logarítmicas, y que los posibles fallos de los electrodos en la desinfección electroquímica se corrigen alternando la polaridad.

- Xueming Chen, Guohua Chen, Po Lock Yue. (2002). *“Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation”*. Chemical engineering science 57, 2449-2455.

En este trabajo se verifica que la electrocoagulación es un proceso efectivo para desestabilizar coloides en los tratamientos de aguas potables, residuales e industriales. Se muestran las reacciones y ecuaciones del transporte de iones durante la electrólisis, así como el sobrepotencial necesario para vencer la capa de difusión, y que la electrólisis transcurra a la velocidad deseada. Se estudia el voltaje suministrado en las celdas electroquímicas actuando sobre ánodos de sacrificio de aluminio y hierro, para producir los iones de  $Al^{3+}$  y  $Fe^{3+}$  de marcado efecto coagulante. Se muestra un equipo experimental para estudiar los efectos del pH, caudal, densidad de corriente y conductividad eléctrica de las aguas a tratar. Se suministran dos modelos matemáticos aplicables a electrodos de aluminio pasivado y no pasivado.

- Guohua Chen, (2004). *“Electrochemical technologies in wastewater treatment”*. Separation and purification technology (38) 11-41.

Este trabajo examina el desarrollo, el diseño y aplicaciones de tecnologías de electroquímica en el tratamiento de agua y aguas residuales. El enfoque especial fue dado a electrodeposición, a electrocoagulación (EC), a electroflotación (EF) y electrooxidación. La electrodeposición es eficaz en la recuperación de metales pesados de aguas residuales. Este es considerado como una tecnología establecida con el desarrollo adicional posible en la mejora de espacio - tiempo. EC ha sido usada para la producción de agua o el tratamiento de agua residual. Este descubrimiento tiene más aplicaciones usando electrodos aluminio, hierro o híbridos de Al / Fe. La separación del lodo floculado del agua tratada puede realizarse usando EF. La tecnología de EF es eficaz para retirar partículas coloidales, aceite y grasa, así como contaminantes orgánicos.

- Barada Prasanna Dash, Sanjeev Chaudhari, (2005). "*Electrochemical denitrification of simulated ground water*". Water Research (39) 4065-4072.

La desnitrificación de agua subterránea por electroquímica fue investigada con el objetivo de maximizar la transformación de nitrato a nitrógeno gas. Fueron escogidos como materiales de electrodos aluminio, grafito, hierro y titanio. Con electrodos de aluminio, de hierro y de titanio han obtenido una reducción de nitrato del 70 - 97 %, mientras que con electrodos de grafito la reducción fue solamente del 8 %. El nitrato fue transformado a amoníaco con electrodos de aluminio y hierro, pero con electrodos de titanio el nitrógeno fue aparentemente el producto final más importante. La reducción del nitrato con electrodos de titanio fue retardada en presencia de iones cloruro posiblemente debido a la formación de iones de hipoclorito. El estudio indica que el proceso podría ser apropiado para la desnitrificación del agua potable o agua residual.

Entre otros, los antecedentes estudiados permiten suponer que el proceso de electrocoagulación aplicado a las aguas residuales, en salida de secundario de una depuradora, conseguiría, frente a las tecnologías convencionales actualmente aplicadas, unas ventajas muy importantes que podemos resumir en:

- Un ahorro importantísimo de adición de reactivos. En un proceso químico convencional, los iones necesarios para la coagulación son aportados por compuestos como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico, que entran en disociación en solución, provocando el efecto deseado de la coalescencia de las partículas. En un proceso electroquímico, los iones son aportados por el metal de los electrodos entre los cuales se aplica una diferencia de potencial, ocasionando un aporte de cargas lo que provoca la unión y/o aglomeración de partículas para su posterior sedimentación. Las partículas suspendidas en el agua presentan un grado elevado de estabilidad debido a su carga, que generalmente es negativa.
- Lo que se consigue con la electrocoagulación es, por medio de una corriente eléctrica, generar una buena cantidad de iones de carga contraria (positiva) que producen la neutralización (desestabilización) de esas partículas; la materia desestabilizada se agrega para formar partículas de mayor peso, lo que hace más fácil su eliminación por cualquier método de separación.

- Una producción menor de fangos que en la coagulación normal que además, contendrán menos agua (menor coste de transporte).
- Una eliminación de materia orgánica muy efectiva, asociada al fenómeno de adsorción en el proceso de coagulación-precipitación.
- Una elevada reducción de metales pesados pues el proceso aumenta el pH de las disoluciones a tratar por lo que se favorece la formación de hidróxidos de metales pesados.
- Altas eficiencias energéticas y tiempos cortos de tratamiento por lo que se pueden tratar coloides poco cargados y en definitiva supone menores costes que los métodos convencionales.
- Baja ocupación de espacio.
- Ausencia de olores derivados del tratamiento.
- La tecnología electroquímica se considera una técnica favorable desde el punto de vista medioambiental.

Estas circunstancias justifican plenamente el objetivo principal de esta investigación que no es otro que profundizar en el conocimiento de la tecnología de electrocoagulación como alternativa de tratamiento terciario que permita mejorar la calidad final del agua regenerada para poder fomentar e incentivar su consumo.

En este sentido, se hará especial hincapié en el análisis de los principales factores que pueden afectar a la aptitud de las aguas para una reutilización que son los siguientes: Contaminación físico-química de las aguas (DQO, turbidez, SS, nitrógeno y fósforo), contaminación biológica de las aguas (Bacterias indicadoras de contaminación fecal, Legionella, presencia de parásitos como tenia y nemátodos).

Además, como elemento diferenciador de esta tecnología frente a las anteriormente citadas, la electrocoagulación previsiblemente conllevará una reducción importante de metales y, eventualmente, bajo determinadas condiciones, de ciertas sales y de la dureza del agua. Estas variables serán también analizadas en la presente investigación.

Finalmente, otra cuestión preocupante de la reutilización de las aguas mediante cualquier tecnología es el coste del agua reutilizada, siendo un factor importante la vida útil de los

electrodos. Surge así el tercer objetivo global de la investigación sobre el comportamiento de los diferentes materiales aptos para su utilización como electrodos, valorando a largo plazo cuál es la vida útil real de los mismos y cuál su rendimiento efectivo. Esta cuestión se estudiará en relación con las diferentes posibilidades de configuración del reactor de electrocoagulación, se atenderá igualmente a la influencia de la distancias entre placas.

## **2.2. Fundamento teóricos de la electrocoagulación**

### **2.2.1. Fundamento teórico del proceso de electrocoagulación**

Los electrolitos son sustancias que careciendo de carácter metálico y en disolución, son capaces de conducir la corriente eléctrica. No todos los electrolitos presentan la misma oposición al paso de la corriente eléctrica. La conducción de corriente eléctrica por una disolución electrolítica va acompañada de cambios químicos que tienen lugar en los extremos del conductor introducido en la disolución. Estos cambios dependen del polo de la corriente.

Se define la electrólisis como la reacción química de descomposición del electrolito al paso de la corriente continua cuando introducimos dos electrodos en una disolución electrolítica o en un producto iónico fundido y aplicamos una diferencia de potencial continua entre ellos. La reacción química producida por la corriente eléctrica tiene lugar en la superficie de los electrodos, que son los conductores metálicos introducidos en la disolución.

La conductividad eléctrica de la disolución electrolítica y las reacciones químicas que se producen en los electrodos, son fenómenos perfectamente relacionados entre sí. Esta relación fue deducida por Faraday de forma experimental y expresada mediante las leyes que llevan su nombre, las cuales cuantifican los procesos electrolíticos, siendo:

La cantidad de electrolito descompuesto en una cuba electrolítica, al paso de la corriente eléctrica es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que ha circulado a través de dicha disolución:

$$m = K_1 \cdot Q$$

Cuando circula la misma cantidad de electricidad ( $Q = I \cdot t$ ) por varias cubas electrolíticas conectadas en serie, las cantidades de electrolitos descompuestos son directamente proporcionales a los equivalentes químicos de dichos electrolitos:

$$\frac{m_A}{E_{qA}} = \frac{m_B}{E_{qB}} = \frac{m_C}{E_{qC}} = K_2 \rightarrow m = K_2 E q$$

La cantidad de electricidad que ha de circular por la cuba electrolítica para que en los electrodos se deposite o desprenda un equivalente químico de cualquier sustancia es constante e igual a 96.480 culombios, denominándose a este como valor Faraday, luego

$$1F = 96.480 \text{ C}$$

Puesto que la corriente eléctrica es un flujo de electrones, F será un múltiplo de la carga del electrón, ese múltiplo resulta de multiplicarla por  $N_A$ .

$$F = N_A \cdot q_e$$

Luego un Faraday es la cantidad de electricidad que contiene un mol de electrones.

Puesto que las sustancias que reaccionan en los electrodos son iones el equivalente químico, será igual a un mol de sustancia dividido por el número de cargas del ión correspondiente (valencia:  $v$ ).

Estas tres leyes se pueden recopilar bajo la siguiente expresión:

$$m = \frac{1}{F} \cdot I \cdot t \cdot E_q$$

donde:

$m$  = masa depositada o desprendida en cada electrodo [gramos]

$I$  = intensidad de la corriente eléctrica aplicada [amperios]

$t$  = tiempo de actuación de la corriente eléctrica [segundos]

$E_q$  = equivalente electroquímico ( $E_q = M; M$  = masa molecular;  $v$  = valencia)

$F$  = Faraday (96.480 culombios)



Así como la conductividad metálica consiste en un flujo de electrones a través del conductor metálico, la conductividad de una disolución electrolítica consiste en un transporte de carga eléctrica por los iones existentes en la disolución, que equivale al transporte de electrones desde el electrodo negativo al positivo.

Por consiguiente, y como consecuencia de las leyes de Faraday, ya que son descargados en ambos electrodos cantidades equivalente de ambos iones, el número de electrones tomados por el catión, en el electrodo negativo, ha de ser igual al de electrones depositados simultáneamente por el anión en el electrodo positivo. Ese mismo número habrá de ser los que circulan por el conductor metálico, externo a la cuba, que forma parte del circuito eléctrico.

En general:

- Al electrodo donde los aniones depositan los electrones, es decir, del que salen los electrones hacia el circuito exterior se denomina ánodo.
- Al electrodo donde los cationes captan los electrones, es decir, al que llegan los electrones por el circuito exterior se denomina cátodo.

Indudablemente las reacciones que tienen lugar en ambos electrodos son:

En el cátodo:  $Mn^{+} + ne^{-} \rightarrow M$

En el ánodo:  $xn^{-} \rightarrow ne^{-} + X$

Puesto que el proceso de captación de electrones se denomina reducción y el de donación de electrones se denomina oxidación, podemos concluir:

- Cátodo es el electrodo en el que tiene lugar la reducción
- Ánodo es el electrodo en el que tiene lugar la oxidación

De forma resumida, podemos concluir que cuando se ejecuta un procedimiento electroquímico, se producen simultáneamente seis funciones básicas entre los dos electrodos y en la solución electrolítica:

1. Oxidación: Se proporcionan electrones al ánodo para oxidar las impurezas presentes en la solución.
2. Reducción: Se proporcionan electrones por el cátodo para reducir las impurezas presentes en la solución.
3. Electroforesis: Los iones con carga o cargas positivas se mueven desde el ánodo al cátodo; mientras que los iones con carga o cargas negativas se mueven desde el cátodo al ánodo.
4. Ataque electroquímico: Si el ánodo está hecho de un metal barato, el ánodo se somete a una ionización de modo de oxidación para liberar cationes mediante la aplicación de un voltaje adecuado entre los dos electrodos, para hacer que la solución tenga la conductividad apropiada.
5. Electrólisis: El agua se descompone en hidrógeno y oxígeno.
6. Polarización: Las impurezas y las moléculas de agua se polarizan en respuesta a la aplicación del campo eléctrico formado entre los dos electrodos cuando se aplica el voltaje adecuado, de forma que los iones con carga o cargas negativas se acumulan cerca del ánodo y los iones con carga o cargas positivas se acumulan cerca del cátodo.

Las reacciones electroquímicas son la causa de las transformaciones químicas que sufren las sustancias cuando se trabaja en un proceso de electrólisis, con paso de corriente eléctrica a través de los electrodos.

Las transformaciones químicas generadas consisten en una ganancia o pérdida de electrones (reducción u oxidación) mediante la intervención de un electrodo, que hace de soporte de electrones y de la disolución electrolítica, que permite el transporte de sustancias que se van a electrolizar desde la disolución hasta los electrodos. En la siguiente figura se puede observar que en la interfase 1 se produce una reacción electroquímica de oxidación ó anódica, y en la interfase 2 se produce una reacción electroquímica de reducción o catódica.

1.  $\text{Red} - n e \leftrightarrow \text{Ox}$
2.  $\text{Ox} + n e \leftrightarrow \text{Red}$

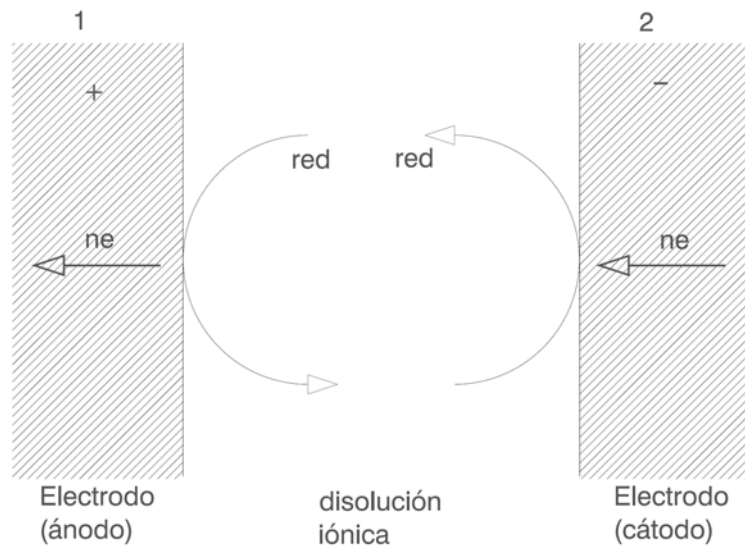


Figura 2.1. Proceso de oxidación-reducción

Para la aparición de estas reacciones electroquímicas, se necesitan los siguientes elementos: célula electrolítica, electrodos, generador de energía eléctrica, conductores y aparatos de control o de medida, además de las disoluciones de electrolito y las sustancias que se van a electrolizar.

Por otro lado para que ocurra el flujo de sustancias desde la disolución hacia el electrodo, o viceversa en el caso de los productos de la reacción, necesita de la existencia de un gradiente de concentración a través de una capa de difusión.

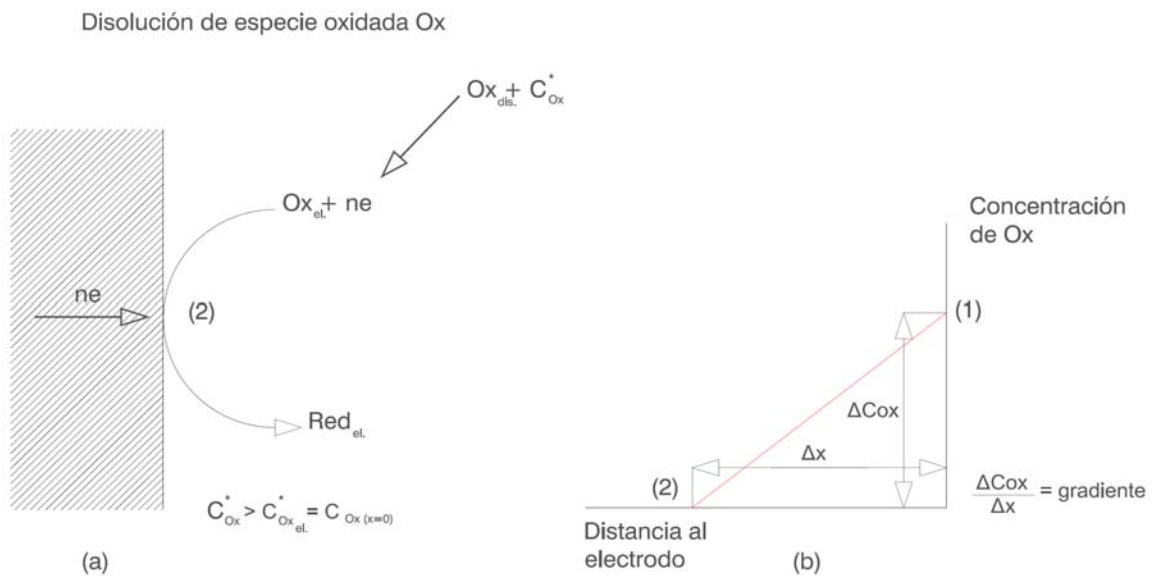
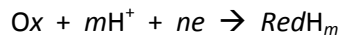


Figura 2.2. a) reacción electroquímica previa, b) establecimiento del gradiente de concentración.

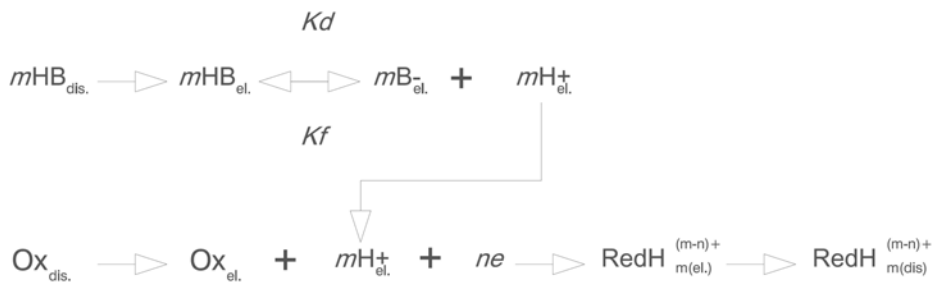
Una reacción electroquímica consta de dos etapas, en su versión simplificada: 1) difusión hacia el electrodo de sustancias que se van a electrolizar, 2) intercambio electrónico, 3) difusión, desde el electrodo, del producto de la electrólisis.

Las reacciones químicas pueden ser más complejas dándose los siguientes casos (Trémillon (1990), Pingarrón et al., 1999):

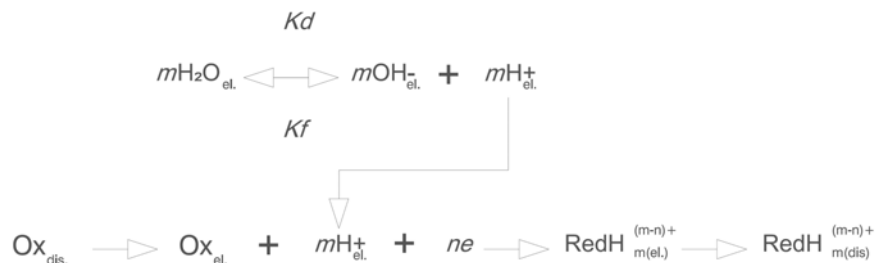
- a) Cuando una reacción química va acompañada de la incorporación de un protón, como es el caso en el proceso en un medio ácido fuerte.



- b) En un medio ácido débil (HB), el proceso se complica, ya que para que intervenga el protón hace falta que el ácido se disocie, según las etapas siguientes:



- c) Puede ocurrir que el medio carezca de especies ácidas (disolución neutra). En este caso, serán las moléculas de agua las que se disociarán para dar lugar al proceso redox, según las siguientes etapas:



Tanto en el caso a) como en el b) se producen además, los procesos de difusión de  $H^+$  y de HB desde la disolución hasta el electrodo, como se puede observar en la siguiente figura.

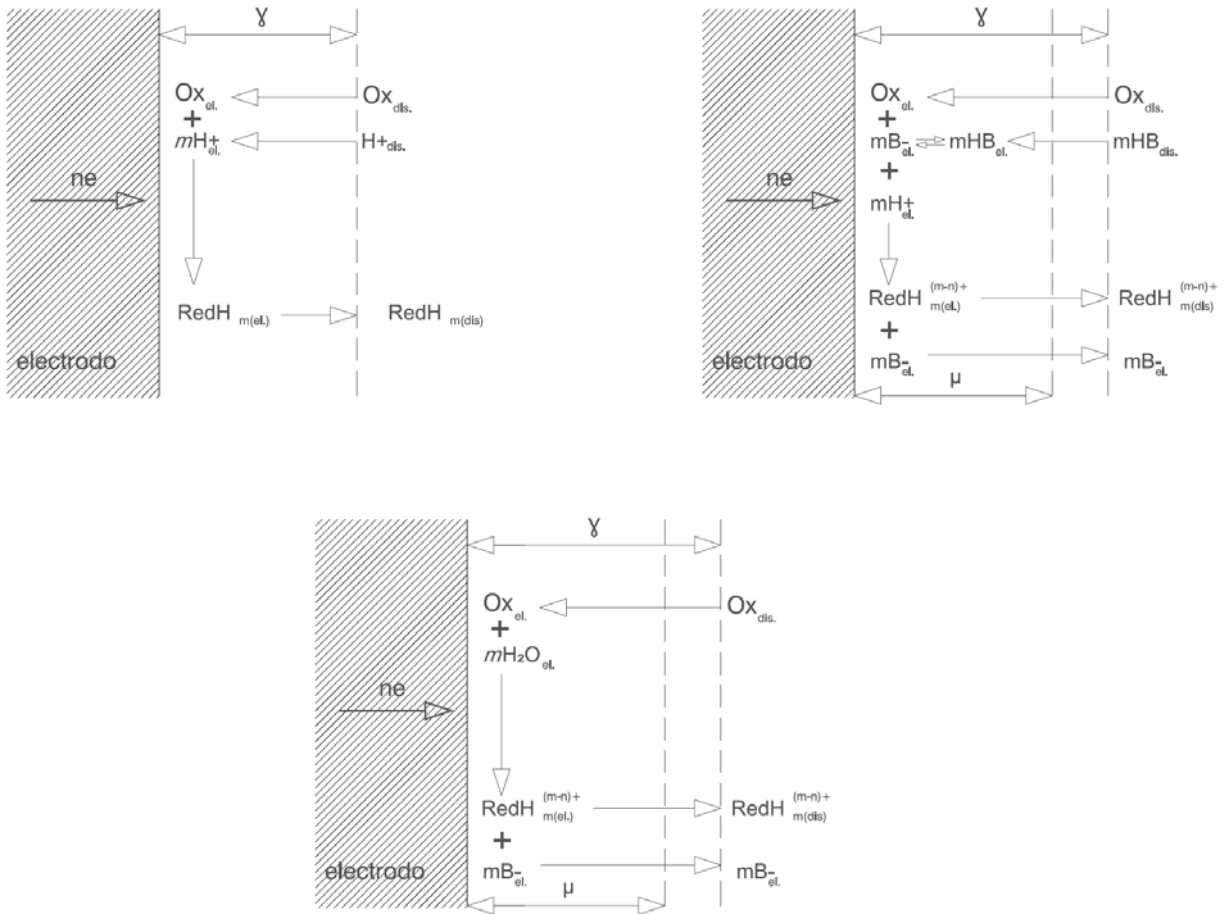


Figura 2.3. Reacciones electroquímicas a) en presencia de un ácido fuerte, b) en presencia de un ácido débil (HB), c) en ausencia de ácidos y bases.

La oxidación de Red da lugar a los procesos inversos, es decir, liberación de iones  $H^+$  en la superficie del electrodo, Así, si en la solución no existe ningún aceptor de protones, se producirá su difusión desde el electrodo hacia la disolución, como puede observarse en la figura siguiente. Mientras que en aceptores de  $H^+$  (B u  $OH^-$ ) se producirán reacciones químicas ácido base posteriores acopladas al proceso redox, como se observa en las figuras siguientes.

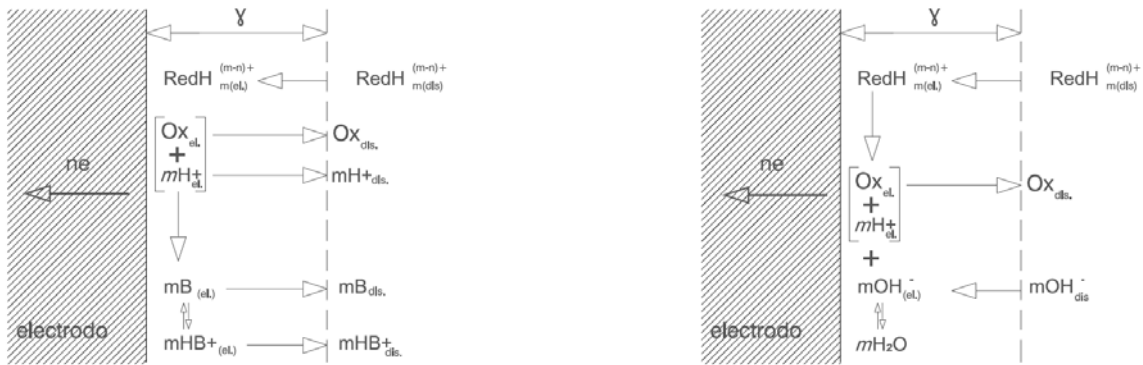
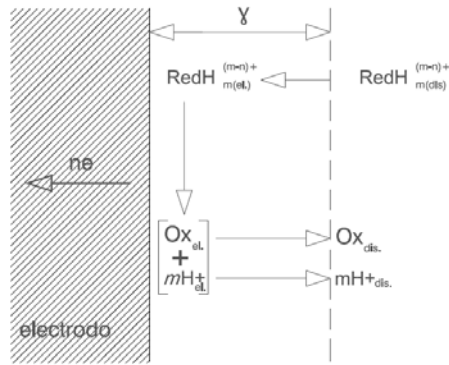


Figura 2.4. Reacción electroquímica de oxidación de Red: a) con liberación de H<sup>+</sup>, b) en presencia de una base débil, c) en presencia de una base fuerte.

Así como la conductividad metálica consiste en un flujo de electrones a través del conductor metálico, la conductividad de una disolución electrolítica consiste en un transporte de carga eléctrica por los iones existentes en la disolución, que equivale al transporte de electrones desde el electrodo negativo al positivo.

Por consiguiente, y como consecuencia de las leyes de Faraday, ya que son descargados en ambos electrodos cantidades equivalente de ambos iones, el número de electrones tomados por el catión, en el electrodo negativo, ha de ser igual al de electrones depositados simultáneamente por el anión en el electrodo positivo. Ese mismo número habrá de ser los que circulan por el conductor metálico, externo a la cuba, que forma parte del circuito eléctrico.

La primera ley de Faraday relaciona la cantidad de sustancia electrolizada (producida o consumida) con la cantidad de electricidad que pasa por la célula electrolítica.

La segunda ley de Faraday establece que la masa de la sustancia electrolizada es proporcional a su peso equivalente.

### **2.2.2. Electrocoagulación, electrofloculación y electroflotación en su utilización práctica actual**

Por un lado se hace referencia a la electrocoagulación como producción electroquímica de agentes de desestabilización que provocan la neutralización de carga para la eliminación de contaminantes de la solución. Igualmente se refiere la aplicación actual a la electrofloculación como producción electroquímica de agentes que promueven partículas de puente o unión.

En relación con la electrofloculación, consistente en la formación de burbujas, un aumento en el tamaño de burbuja ha sido observado en cátodos con sobrevoltage más pequeño para la evolución de hidrógeno (ejemplo Pd, W, Ni) en comparación con materiales de altos sobrevoltajes (ejemplo Cu, Sn, Pb). La generación de burbujas en la electroflotación cede burbujas de óptimas dimensiones que son independientes de las condiciones de la solución. Los ánodos más durables (tiempo de vida estimado aproximado 5 años) pueden emplearse para la producción de O<sub>2</sub> en la electroflotación de aguas residuales. Si el gas de hidrógeno es producido sobre el cátodo, usándose Fe o Al como ánodos, los iones de Fe<sup>n+</sup> o Al<sup>3+</sup>, que resultan de la oxidación del ánodo pueden reaccionar con iones OH<sup>-</sup> producidos en el cátodo y los hidróxidos insolubles generados precipitarán, adsorbiendo contaminantes de las soluciones (ejemplo metales tóxicos como Cr (VI), o Hg), y contribuyen también en los procesos de coagulación - floculación, (Rajeshwar et al., 1997), como se puede observar, en la siguiente figura, como el hidróxido de Fe (III) precipita más fácilmente que los hidróxidos de Fe (II), el aire u oxígeno deben ser inyectados dentro de la solución para oxidar al Fe (II) a Fe (III) y ayude al proceso de flotación.

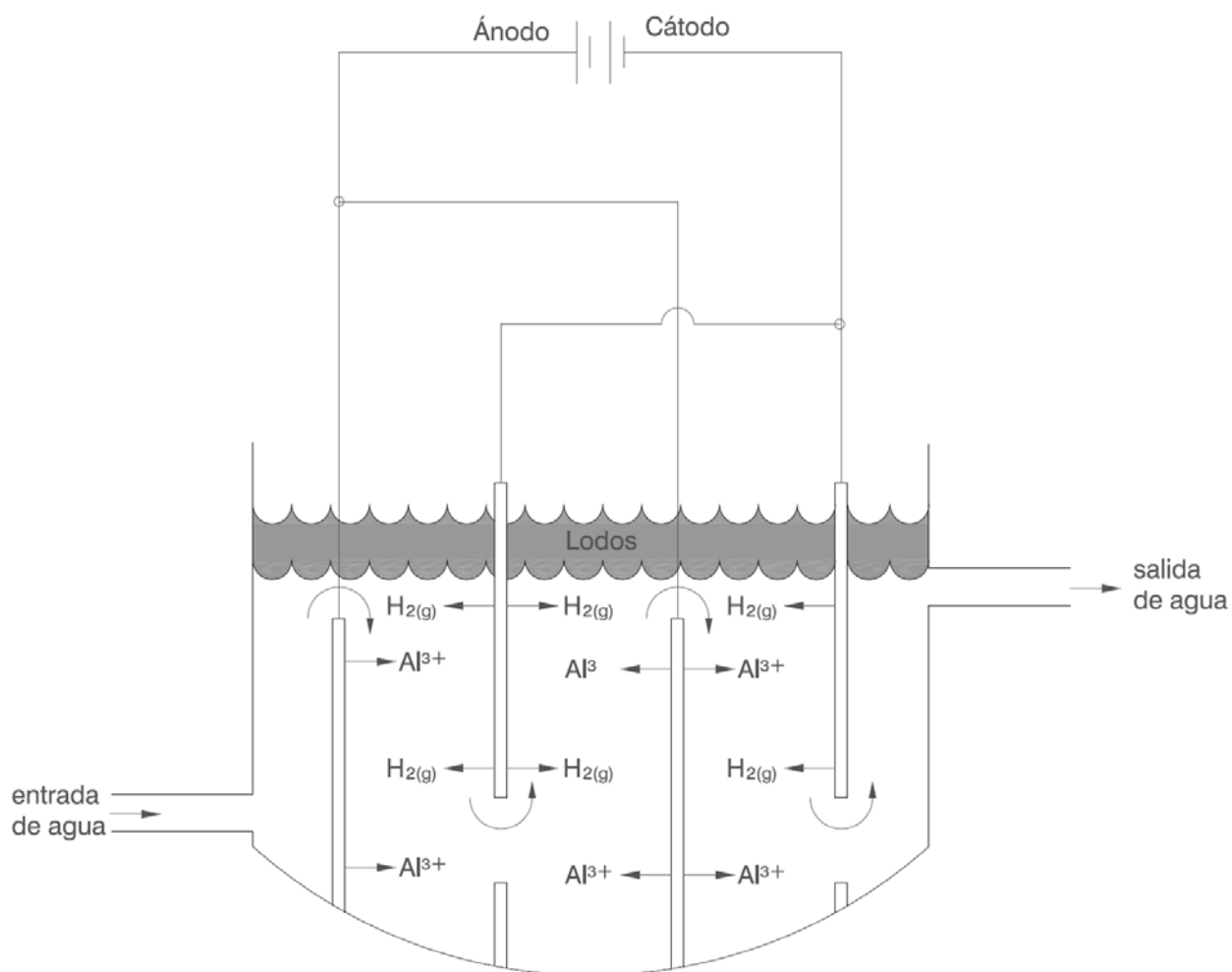


Figura 2.5. Proceso de floculación-coagulación

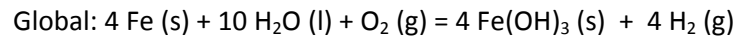
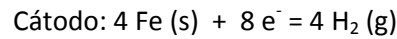
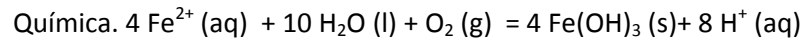
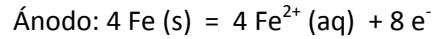
Se observa igualmente una eliminación simultánea de aceites y metales pesados. Una combinación de precipitación química (hidróxidos, sulfuros) y proceso de flotación por aire es, en cierto modo, similar al proceso electroquímico.

Los procesos de electrocoagulación – electroflotación pueden combinarse, por ejemplo con microfiltración, para mejorar la calidad de agua para riego; en este caso, puede conseguirse una eliminación de la turbidez del 99%, 77% de DQO, y 98% sólidos suspendidos. Otro proceso combinado interesante involucra la adición de un coagulante químico,  $Fe_2(SO_4)_3$  y el establecimiento de una diferencia de potencial entre dos electrodos. Un decrecimiento en el potencial zeta estabilizador, permite que la fuerza de atracción de Van de Waals predomine, y puede conseguirse la eliminación del 96% de aceite.

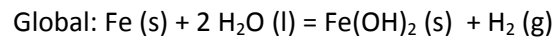
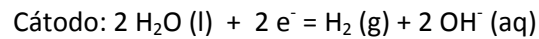
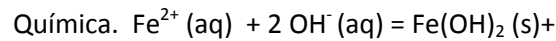
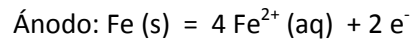


En el caso de ánodos de hierro y acero, se pueden establecer dos mecanismos para la producción de hidróxidos metálicos.

En el mecanismo 1:



En el mecanismo 2:



La electrocoagulación ofrece en principio una serie de ventajas que se mencionan a continuación:

- 1) Pueden ser tratadas las cargas coloidales más pequeñas, debido a que pueden moverse más fácilmente que sus homólogos más grandes dentro de un campo eléctrico, esto facilita la coagulación. Además, tal movimiento evita la necesidad de agitación mecánica, el cual si es incontrolado puede destruir los precipitados tan pronto como son formados.
- 2) La cantidad de productos químicos requeridos es mucho más baja (del orden de 1/10). Por ejemplo, en el proceso convencional de neutralización por cal, se incrementa la dureza de agua. Con el proceso de electrocoagulación la dosis de cal es inferior, mejorando el proceso y la calidad de las aguas.
- 3) Se producen pequeñas cantidades de lodo en su acción de coagulación, debido al alto contenido de sólidos secos. Además, el lodo producido por tratamiento electroquímico es más hidrófobo, lo que origina residuos más compactos, igualmente se reducen los tiempos de decantación.
- 4) No se requiere mezcla de productos químicos.

- 5) La durabilidad de los electrodos reduce los bajos tiempos improductivos para el mantenimiento o sustitución.
- 6) La reducción de materia orgánica, incluyendo materia orgánica no biodegradable, es más efectiva, esto facilita el tratamiento biológico siguiente.
- 7) La dosificación de coagulante, así como el sobrepotencial necesario, puede ser fácilmente calculado y controlado.
- 8) Estos procesos son apropiados para pequeñas plantas de tratamiento.
- 9) Se observa normalmente un aumento del pH, el cuál ayuda en la eliminación de iones de metales pesados por su precipitación como hidróxidos o por la adsorción en otros flóculos o precipitados.
- 10) A menudo, no es necesario el control del pH, a menos que éste parámetro adquiera valores extremos.
- 11) Con el sistema de electrocoagulación puede conseguirse una alta reducción de sólidos, altas eficiencias (aprox. 90%) en sistemas bien diseñados.
- 12) Se requieren tiempos de retención cortos. Por ejemplo, son suficientes 8 minutos para el tratamiento de la decoloración de aguas residuales procedente de la industria textil.
- 13) Los costos de operación son muchos mas bajos comparados con tecnologías convencionales equivalentes, que garanticen los mismos resultados.

Los problemas más importantes, a considerar en los procesos de electrocoagulación, son los siguientes:

- 1) La producción del H<sub>2</sub> en el cátodo, puede impedir la decantación apropiada de la materia coagulada.
- 2) La concentración de iones aluminio o hierro en el efluente muy probablemente se incrementará. Un cuidadoso control de pH sería necesario, si el contenido Al o Fe se saliese de los límites admisibles.
- 3) La producción de hidróxidos insolubles puede agruparse entre los electrodos, dificultando su producción adicional. Las alternativas, como solución a este problema, incluyen el uso de un ánodo móvil, provocando una alta turbulencia, introducción de gas, o agitación mecánica. Los electrodos de lecho fluidizado han sido utilizados para limpiar las superficies de los electrodos con una corriente erosiva moderada.

- 4) Estos procesos con corriente continua están frecuentemente acompañados de la pasivación del ánodo y la deposición de lodo sobre los electrodos. Para prevenir esto, se puede usar corriente alterna con impulsos inversos controlados, o la activación del ánodo por la adición de iones como cloruro con el fin de bajar considerablemente la polarización anódica requerida y facilitar continuamente la renovación de la superficie de los electrodos del metal oxidado en el impulso siguiente. Por otro lado, la generación de hidrógeno provoca el debilitamiento de adherencia entre el lodo y el electrodo, permitiendo su desprendimiento y separación. Este procedimiento tiene la ventaja adicional de duplicar el tiempo requerido para la sustitución del electrodo.
- 5) Los costes de inversión son relativamente altos, aunque los costos de explotación tienden a ser más bajo que otras técnicas.

Otros factores externos que promueven la coagulación-sedimentación de los floculos electrogenerados incluyen los campos magnéticos, que provocan la sedimentación sin interferir en el proceso, y la adición de cantidades pequeñas de factores que generan procesos de floculación – coagulación, como por ejemplo polímeros floculantes como cloruro de aluminio.

El proceso puede utilizarse para la limpieza de emulsiones de aceite y agua. El derrame de aceite voluntario o involuntario en diferentes cuerpos de agua es una preocupación ambiental. El aceite así como los hidrocarburos en general, pueden alterar significativamente las propiedades del agua y producir cambios ópticos así como color opacidad, impacto estético negativo, olor fétido, mal sabor, cambios en la viscosidad y conductividad. Desafortunadamente hay muchas fuentes de contaminación de aceite sobre cuerpos de agua, por ejemplo, refinerías, tejidos, plataformas petrolíferas, máquinas de corte, transporte de petróleo, instalaciones de almacenamiento y distribución, derrames subterráneos, etc.

Los aceites pueden propagarse y dispersarse en aguas residuales principalmente de la siguiente manera: a) como fase separada (capa sobrenadante), b) como gotitas coloidales (emulsiones), c) como partículas disueltas, d) como especies adsorbidas sobre materia particulada suspendida.

Las principales fuerzas de interacción entre gotitas de emulsión pueden ser tanto atractiva (Van der Waals) y de repulsión (electrostática). Generalmente las partículas de coloidales oleosas tienen cargas negativas sobre su superficie debido a la carga de fricción, o a la ionización de los grupos carboxílicos hidrofílicos. Estas cargas son principalmente responsables de las fuerzas de repulsión que impide el choque de las partículas y tengan la oportunidad de flocularse o unirse. Cuando se adicionan cationes, se neutralizan los coloides, y facilita la floculación.

Para eliminar los aceites suelen utilizarse coagulantes orgánicos e inorgánicos, como poliaminas,  $H_2SO_4$ ,  $AlCl_3$ ,  $Fe_2(SO_4)_3$ . Desafortunadamente, estos procesos de adición de químicos requieren cantidades relativamente grandes de productos químicos, así como períodos de tiempo de retención largos, y producen grandes volúmenes de lodos, siendo incapaces de coagular los coloides más pequeños. Un efecto adicional causado por los iones de  $Fe^{+3}$  es la oxidación del agente emulsionando.

La adición de iones metálicos (polivalentes) con alta densidad de carga también puede ser afectado por la electrodisolución controlada con ánodos de metal solubles como Fe, Al, y acero. La diferencia de potencial en el ánodo debe ser controlada. Si este ánodo se pone demasiado positivo puede pasivarse y su disolución parará, como puede deducirse del diagrama de Pourbaix para el sistema de  $M - H_2O$  (Rajeshwar et al., 1997). El control cuidadoso del potencial aplicado y la adición de iones cloruro pueden prevenir este efecto de pasivación. Por otro lado, si el potencial aplicado no es suficientemente seguro, el metal estaría en la región de pasivación del diagrama de Pourbaix y la disolución no será viable.

Como se mencionó anteriormente, la reacción catódica correspondiente es normalmente la reducción de  $H_3O^+$  en un cátodo inerte. Aquí, el gas de  $H_2$  se desarrolla y asciende con los flóculos, o precipitado suministra una gran área superficial para la adsorción de partículas de aceite y otras impurezas que pueden estar contenidas en la solución acuosa. El aumento de pH concomitante facilita la floculación o precipitación de hidróxidos de iones metálicos en el lodo. La capa aceitosa y el lodo sólido producido en este proceso de electrocoagulación - electroflotación pueden ser retirados mecánicamente. Se pueden conseguir eficiencias de eliminación de aceite hasta un 96-99 %.

### 2.2.3. Electroflotación

La electroflotación involucra la producción de electrolítica de gases que puede usar para fijar contaminantes a las burbujas de gas (por ejemplo de  $O_2$ ,  $H_2$ ) y llevarlos hasta la superficie de la solución donde pueden ser más fácilmente recogidos y retirados.

Un problema corriente en el tratamiento de efluentes es la separación de sólidos en suspensión y emulsiones o partículas coloidales de aceite u otros compuestos en el agua. La separación es esencial para disminuir la DBO del efluente a niveles aceptables, antes de ser descargadas a un cuerpo de agua. Tales efluentes contaminados surgen en la industria petrolera, ingeniería, en los talleres de imprenta y pintura, en la industria de procesamiento de alimentos, en fábricas de papel, de fibras textiles y de vidrio (Pletcher et al, 1990).

El enfoque tradicional para la solución de estos problemas es permitir que el efluente esté almacenado en tanques hasta que la separación se consiga en dos fases. Tales métodos pueden ser costosos, si son importantes los volúmenes de líquido a almacenar por períodos de tiempo prolongados. Por lo tanto, es normal:

- 1) añadir a agentes de floculación, comúnmente iones inorgánicos ( $Al^{+3}$ ,  $Fe^{+3}$ ), a la mezcla.
- 2) usar el proceso de flotación con aire disuelto.

En el primer método, un agente floculante, sin embargo, representa un coste adicional y puede constituir un peligro ambiental, por lo que su adición requiere un procedimiento seguro, y la concentración debe ser controlada.

En el segundo método, las pequeñas burbujas de aire se elevan a través del efluente y arrastrar el material suspendido a la superficie, donde pueden ser retirados mediante rastrillos o paletas por aliviadero. Este método requiere una fuente de aire comprimido bien diseñada para conseguir un suministro uniforme de burbujas muy pequeñas a través del tanque.

Hay versiones electroquímicas, que pueden sustituir ambas operaciones. En la electroflotación, los gases son generados electrolíticamente en una celda, como se observa en la siguiente figura. El agua conteniendo partículas orgánicas sólidas o líquidas en suspensión fluye lentamente en la

superficie de la celda y las burbujas de gas ascienden a través del agua capturando la materia orgánica y elevándola a la superficie, la espuma resultante es retirada y el agua purificada sale por la parte inferior del tanque.

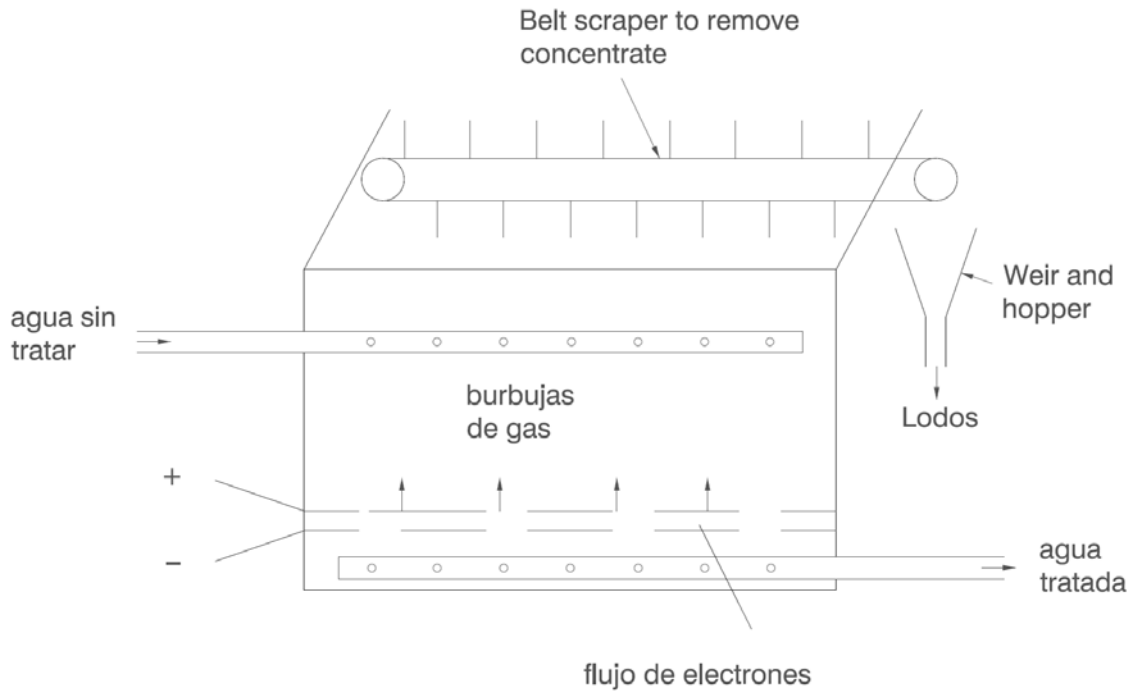


Figura 2.6. Construcción de una celda de electroflotación

Se considera que el mecanismo es, como en la flotación por aire disuelto, puramente mecánico; como las burbujas de gas ascienden arrastran las partículas orgánicas hacia la superficie. En electroflotación además es posible que haya una contribución electrostática al mecanismo. Si las burbujas de gas abandonan los electrodos llevando pequeñas cargas, entonces pueden neutralizar las cargas eléctricas que existen en las partículas coloidales y causar la coalescencia.

En casi todas las aplicaciones de electroflotación, la reacción en la celda es simplemente la electrólisis del agua, así que los gases que se producen son oxígeno e hidrógeno. El tamaño de las burbujas es crítico en la determinación de la eficiencia del proceso de separación, y esto es presumiblemente una función de la densidad de corriente así como de las propiedades del efluente y de la superficie del electrodo. Además, una mayor dificultad en el tratamiento de algunos efluentes es la deposición sobre la superficie del cátodo, que aumenta el tamaño de la

burbuja. La que surge del incremento del pH en la superficie del cátodo, lleva a la precipitación del magnesio y otros hidróxidos metálicos. La densidad de corriente empleada es baja ( $0,1 - 10 \text{ mA/cm}^2$ ), pero incluso entonces, a pesar de utilizar un pequeño espacio entre electrodos, puede ser necesario utilizar voltajes entre  $5 - 10 \text{ V}$ , porque los efluentes, en general, contienen pequeños electrolitos. En conjunto, la energía consumida varía de  $0,2 - 0,4 \text{ kWh/m}^3$  de agua. Ésto se puede mejorar y al mismo tiempo resolver el problema de las decantaciones, mediante la dosificación al efluente con un ácido en bajas concentraciones, pero esto puede ser inadecuado por el costo y efectos sobre el medio ambiente.

Según la bibliografía analizada, la capacidad de una celda de electroflotación varía de  $1 - 50 \text{ m}^3$ , los caudales más grandes registrados son de  $150 \text{ m}^3/\text{h}$  de agua. Una planta típica reducirá de  $1000 \text{ mg/dm}^3$  de sólidos y  $600 \text{ mg/dm}^3$  de aceites hasta un  $30$  y  $40 \text{ mg/dm}^3$  respectivamente. Puede concretarse que los componentes de la celda deberán seleccionarse por su durabilidad y bajo costo. El tanque debería ser de acero inoxidable o de material plástico. En relación con los electrodos se dice: el cátodo será de acero y el ánodo de titanio recubierto de platino, dióxido de plomo sobre titanio.

Un problema señalado en la bibliografía consultada de la electroflotación sobre la flotación por aire es su aplicación a gran escala, con concentraciones altas de sólidos en suspensión, y en la separación de agua de aceite en la industria de petróleo. La mayor desventaja de una celda de electroflotación es la dispersión de oxígeno e hidrógeno. Igualmente es posible presencia de salpicaduras eléctricas, lo que representa un peligro significativo de incendio y explosión.

En la electrofloculación o electrocoagulación, el agente floculante es introducido como resultado de una reacción en el electrodo y tal proceso permite un control cuidadoso de la cantidad de reactivo introducido en el efluente. Así por ejemplo el  $\text{Al}^{+3}$  o  $\text{Fe}^{+3}$  puede ser introducido por el uso de un ánodo de hierro o aluminio, siendo también posible usar tal ánodo en una celda de electroflotación. También el hidróxido de magnesio, o incluso iones de hidróxido producido en el cátodo de celdas de cloro o de hipoclorito, puede actuar como agentes de floculantes, y se puede admitir la combinación de la coagulación con la cloración.

### 2.2.4. Otros usos.

Además de los usos mencionados, las oportunidades para la electroflotación-electrocoagulación-electrofloculación incluyen lo siguiente:

- Eliminación del fósforo: es bastante conocido la eutrofización de los ríos y los lagos a causa de altas concentraciones de fósforo en agua. Los fosfatos pueden ser retirados de un medio acuoso por disolución anódica de Fe o Al, al formar compuestos insolubles de  $\text{AlPO}_4$  o  $\text{FePO}_4$  con adsorción simultánea del fosfato sobre los correspondientes hidróxidos insolubles. Se obtienen una eliminación del fósforo del en más del 90%. Por éste método son eliminados simultáneamente los fosfatos y nitrógeno orgánico. Además, éste puede ser combinado con generación de cloro en sistemas de purificación-desinfección.
- Se discute sobre la construcción de filtros para retirada de hidróxidos metálicos producidos electrolíticamente sobre materiales de particulados como serrín. Los hidróxidos gelatinosos por si mismos, tienen la tendencia de reducir la permeación, el filtrado, y el paso del líquido. Sin embargo, cuando más temprano se depositan, pueden ser usados para una gran variedad de aplicaciones, incluyendo la eliminación de fenoles, tinturas y colorantes, metales disueltos, café, amoníaco, lodos de carbonatos, y otras materias coloidales. Además de los hidróxidos de Al y Fe, mencionados anteriormente, también se han sido utilizados para esta aplicación los hidróxidos de Mg, Ba, Sr, Ni, Cu, Cd, y Mn.
- Tratamiento de aguas conteniendo alimentos y proteínas de desecho, detergentes sintéticos y fluoruros.

Conocedor de toda esta problemática, y de la búsqueda de nuevos procedimientos más eficaces y más económicos, me he interesado por la investigación en este campo de la electrocoagulación y la electroflotación, tanto en el aspecto científico como en el de investigación de aplicación práctica.



### 2.2.5. Desinfección electroquímica del agua.

Los microorganismos pueden ser directamente inactivados electroquímicamente o mediante la generación de agentes eliminadores como los OH. Una tercera vía implica la electrosorción de bacterias y su depósito (fijación) sobre la superficie de los electrodos y su siguiente desactivación. Así como con sus homólogos orgánicos, las rutas directas e indirectas no siempre son distinguibles, y es posible que, en muchos de los estudios hechos hasta la fecha, ambos procesos jueguen un papel importante.

Los materiales de electrodos pueden variar ampliamente, dependiendo del agente desinfectante deseado. Los materiales del cátodo incluyen, acero inoxidable, cobre, grafito, tela de carbono y carbono vítreo reticulado (RVC). Los materiales del ánodo incluyen titanio o niobio platinizado, tántalo, grafito, carbón, óxidos de metales, plata, cobre, níquel, monel, ánodos dimensionalmente estables y combinaciones de éstos. Materiales electrocatalíticos pueden ser incorporados en los electrodos, por ejemplo, en forma de capas, incorporados en separadores de celdas. Electrodos tridimensionales se han usado satisfactoriamente, según la bibliografía consultada.

La tecnología de celda de abertura estrecha involucra el uso de un electrolito de polímero sólido (SPE) (Rajeshwar et al., 1997) ha sido aplicado a la desinfección electroquímica de agua para reducir la resistencia de la celda y evitar la necesidad para añadir electrolitos secundarios. Una alternativa utilizada aparece en los ejemplos considerados más adelante sobre la producción de cloruro e hipoclorito.

Corriente alterna (CA) o continua (CC), tanto como de alta o baja frecuencia, han sido usados con propósitos de desinfección. La formación de depósitos puede ocurrir sobre el cátodo, particularmente en el caso de aguas duras. Este problema ha sido resuelto por la producción de corriente inversa y oscilaciones periódicas del electrodo. El tratamiento con corriente continua o alterna ha sido demostrado en la inactivación de una gran variedad de microorganismos, incluyendo virus, bacterias, algas, coliformes, estreptococos fecales y especies relativamente grandes así como la euglena.

Conocedor de toda esta problemática, en la búsqueda de nuevos procedimientos más eficaces y más económicos, me he interesado por la investigación en este campo de la electrocoagulación y

la electroflotación, tanto en el aspecto científico como en el de investigación de aplicación práctica.

### **2.2.6. Electrosorción de microorganismos y transferencia de electrón directa**

Las bacterias muestran una tendencia de absorción sobre superficies, como carbón activado, fibras de carbón o resinas de intercambio iónico. Este efecto puede ser influenciado por fuerzas electrostática entre grupos de cargas sobre la pared de las celdas (ejemplo grupos amino y carboxílicos) y sobre los adsorbentes. Por ejemplo, una concentración de bacilos gram-negativos fue reducida en orden de 5 veces de magnitud por adsorción sobre carbón activado.

El potencial inducido por adsorción de solutos en la superficie de un electrodo se llama electrosorción y su eficacia depende del potencial de carga cero de los adsorbentes. Éste es también el principio utilizado para el retiro de cuerpos sólidos suspendidos por electrofiltración. Por ejemplo, se ha observado, en la bibliografía analizada, que la aplicación de un potencial externo (positivo con respecto al potencial de carga cero del adsorbente) para un electrodo de fieltro de carbono promovió una reducción en la concentración de *E. coli* en la suspensión que pasa a través del electrodo por tres o cuatro órdenes de magnitud. Se observó una mayor reducción en la concentración de *S. typhimurium*. Curiosamente, este método no es eficaz en la inactivación de microorganismos, debido a que parte de las bacterias pueden regresar a la suspensión.

Aunque este fenómeno no cae estrictamente dentro de la base de la definición de desinfección, retira microorganismos relacionados con enfermedades y lo tanto puede ser un método eficaz para la prevención de los problemas relacionados con las infecciones. Una ventaja adicional es que no necesita la adición de productos químicos para el tratamiento de las suspensiones, el adsorbente puede ser al final parcialmente regenerado, la muerte de los microorganismos no permanecen en el agua tratada y pueden usarse adsorbentes económicos. Una alternativa interesante consiste en la adsorción de bacterias sobre el electrodo. El enfoque de aplicabilidad de la electrosorción por corriente continua para agentes patógenos no bacterianos (virus, protozoos), está por ser establecido.

Un proceso de desinfección electroquímica interesante ha sido el basado sobre la perturbación de corriente alterna de la interfase de electrodo / electrolito. En la parte del ciclo anódico, el agente patógeno adsorbido sobre el electrodo es oxidado. En la porción catódica, los productos de oxidación son retirados de la superficie del electrodo y una superficie de electrodo limpio es regenerada para los ciclos de desinfección siguientes.

Se está pretendiendo justificar, la eficacia de la electrocoagulación no sólo sobre bacterias sino también sobre organismos más grandes como protozoos.

Los mecanismos de electrocución posibles involucran la incorporación de procesos redox anormales o circulación electro-osmótica incluso forzada (anormal) a nivel celular debido a la circulación de corriente. La oxidación electroquímica intercelular, de la coenzima A, ha sido confirmada para la inactivación de bacterias en superficies de electrodos. Este método asegura la reducción del ensuciamiento microbiano del electrodo y de otras superficies. En estos trabajos de investigación se usaron ánodos de carbono. Este enfoque ha sido extendido al uso de grandes áreas superficiales en electrodos de grafito - silicona y carbono - cloropreno.

Una aplicación importante del enfoque de oxidación directa es la prevención de bioensuciamiento marino en estructuras como tubos de agua de enfriamiento y cascos de embarcación. La acumulación de biomasa sobre estas superficies causa resistencia por fricción del fluido en el caso de cascos de embarcación y reducción de la eficiencia de la transferencia de calor en tubos de enfriamiento.

### **2.2.7. Electrogenación, in situ, de agentes de desinfección**

Cloro, ácido hipocloroso, e hipoclorito:

La producción de cloro necesita el uso de sobrepotenciales altos de  $O_2$  y ánodos de sobrepotencial bajo de cloro, ya que el potencial estándar de reducción del cloro ( $E^{\circ} = 1,358 \text{ V}$ ) es más positivo que del oxígeno ( $E^{\circ} = 1,229 \text{ V}$ ), por lo tanto la producción de dióxidos es termodinámicamente favorable. Mezclas de  $Cl_2$  y  $ClO_2$  son producidos normalmente. Los procesos catódicos simultáneos pueden darse de forma favorable en ciertos casos por ejemplo eliminación de iones metálicos, reducción del ión nitrato a  $N_2$ . El rendimiento del cloro normalmente depende

de la concentración de iones cloruro. Como el cloro produce iones cloruro para desinfección u oxidación, el concepto de reciclado puede ser por el reuso del  $\text{Cl}^-$  presente en la solución gastada para producir otra vez cloro. El control automático de la producción de  $\text{Cl}_2$  puede basarse en la concentración de  $\text{Cl}^-$ , o en concentración de  $\text{Cl}_2$  o sobre la cantidad de carga circulada.

La producción del cloro puede producirse a partir del ácido hipocloroso e hipoclorito, ver figura siguiente. Por ejemplo, el  $\text{ClO}^-$  ha sido producido por la aplicación de voltaje de corriente continua en una celda conteniendo solución de sales de cloruro (normalmente álcali o cloruros amoniacales) o HCl. El cloruro de metal puede también adicionarse en forma de tabletas, pastillas, o gránulos. El agua de mar es una fuente de materia prima común para este proceso. Sin embargo, los compuestos inorgánicos como  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  puede producir depósitos que disminuye la eficiencia de producción de cloro del agua de mar. Este problema ha sido resuelto llevando a cabo una limpieza de los ánodos con ácido.

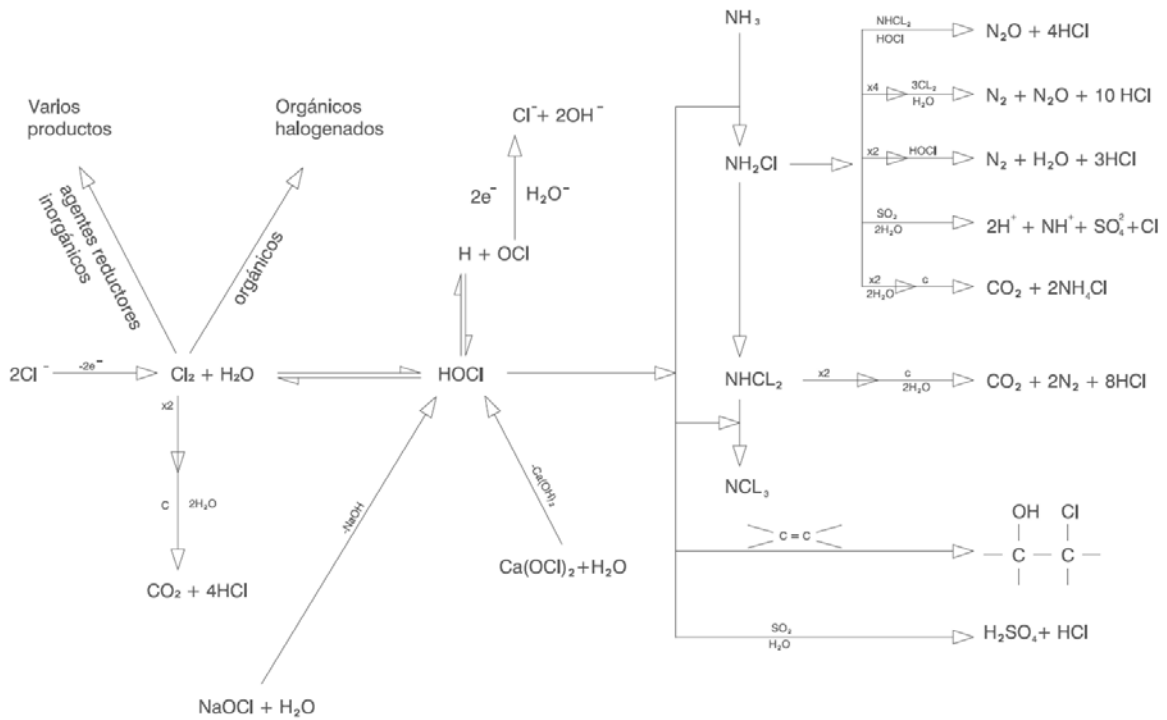


Figura 2.7. Producción y reacciones de  $\text{Cl}_2$  basados en desinfectantes tales como el  $\text{ClO}_2$

La solución alcalina producida en el cátodo en una celda de electroquímica durante la reducción del agua puede permitir mezclarse con la solución de  $\text{Cl}_2$  producida en el ánodo. Los productos resultantes son  $\text{OCl}^-$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{Cl}^-$ . El hipoclorito tiene que ser usado inmediatamente después de la producción ya que puede sufrir una descomposición fotolítica. El  $\text{HOCl}$  es un desinfectante más potente que el  $\text{OCl}^-$ . Por esta razón las membranas bipolares, son usadas para acidificar la solución de hipoclorito, por adición directa de  $\text{HCl}$ , o producción de protones por cambio iónico.

Los hipocloritos de sodio o calcio tienen la ventaja de reemplazar al cloro en muchas aplicaciones de pequeña o mediana escala por ejemplo en piscinas, y la dosificación automatizada de hipoclorito puede realizarse en base a la monitorización del pH o potencial redox.

Una variedad de ánodos son usados para la producción de cloro o hipoclorito para propósitos de desinfección:

- una aleación mezcla de óxidos de paladio, titanio, rutenio, así como una mezcla, que puede ser producida por descomposición térmica de una disolución de pintura con los cloruros de los tres metales.
- Titanio, niobio y tántalo y alguna de sus aleaciones recubiertas con platino u óxidos de platino.
- Grafito, óxido de plomo y ánodos dimensionalmente estables ( $\text{TiO}_2\text{-RuO}_2$ ).

Este sistema de aplicación de la electrocoagulación se considera como muy desarrollado, considerando que no será objeto de la investigación contemplada en esta tesis.

### **2.2.8. Electrogenación de dióxido de cloro**

Una disolución acuosa de  $\text{MClO}_3$  clorato de álcali – metal, se pasa por una resina de cambio catiónico y electrolizada produce una mezcla de  $\text{ClO}_2$  y  $\text{HClO}_3$ . El  $\text{ClO}_2$  es separado por arrastre de vapor. Alternativamente la sal de clorato reacciona con una corriente ácida externa añadida o también por la producida en el ánodo de una celda electroquímica para producir  $\text{ClO}_2$  una mezcla de clorato y ácido clórico se produce por un principio similar para producir  $\text{ClO}_2$  por reducción. Los iones clorato también pueden obtenerse de procesos de electro-diálisis diálisis de un clorato metal alcalino.

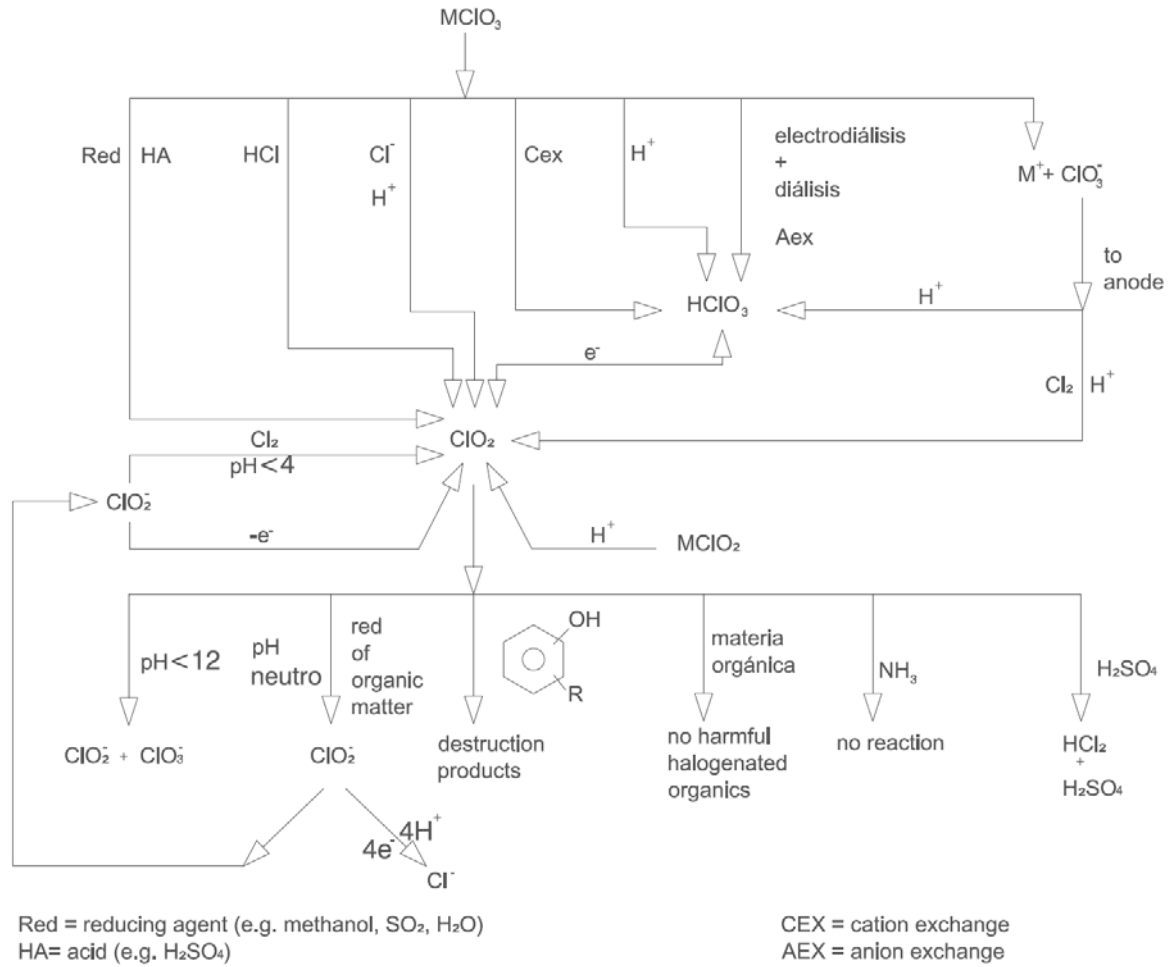


Figura 2 8. Producción y reacción de ClO<sub>2</sub>. Las ecuaciones son representativas y no están balanceadas

El ácido clórico para producir ClO<sub>2</sub> también puede ser obtenido en una celda electroquímica de un clorato metal alcalino, por migración selectiva de los iones clorato por un diafragma hacia el ánodo, donde encuentran los iones H<sup>+</sup> y producen el ácido. Una ruta química más simple consiste en la adición de sulfúrico al clorato sódico, sin embargo el producto resultante contiene impurezas salinas que deben ser eliminadas.

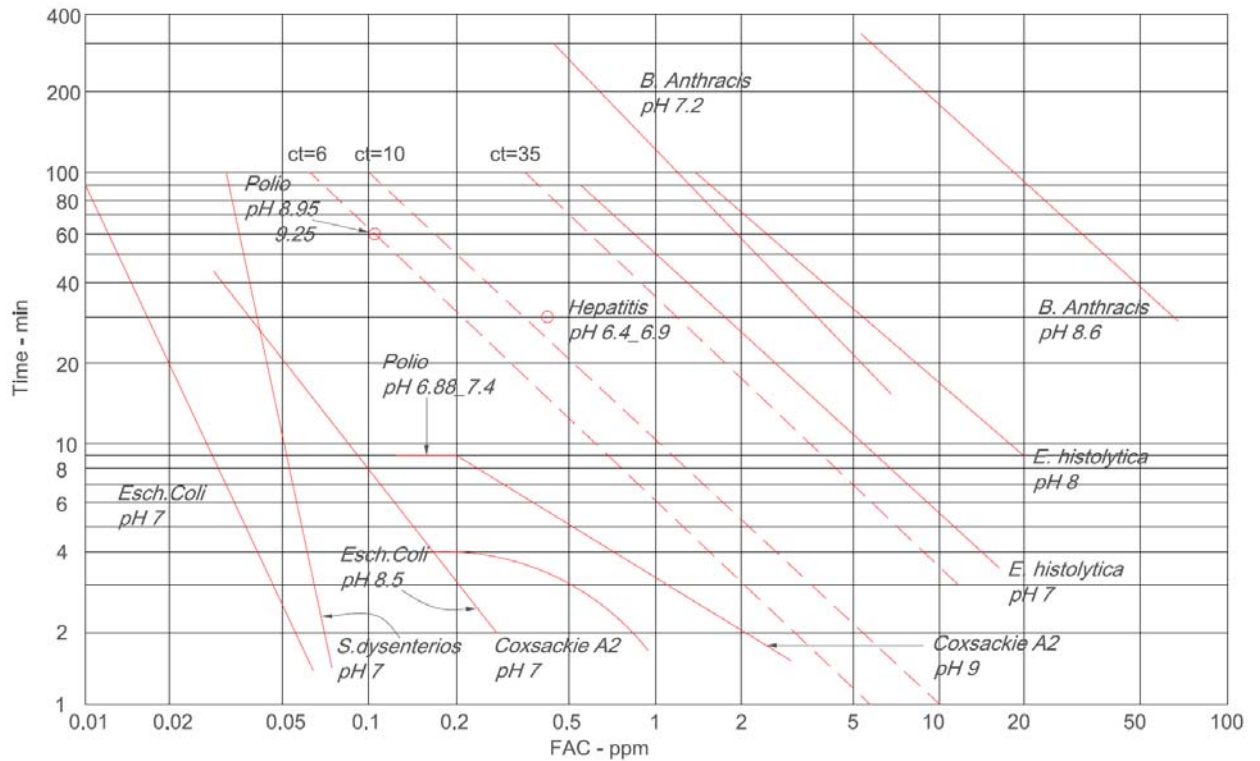
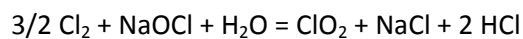


Figura 2.9: Desinfección vs cloro libre residual

Una membrana de cambio catiónico se usa en una celda con electrodos separados para la producción de  $\text{CO}_2$  para tratamiento de aguas residuales industriales y vertidos. El  $\text{ClO}_2$  también se produce en la electrolisis de disoluciones saturadas de cloruro sódico para formar concentrados de cloro, que entonces reaccionan con la disolución de hipoclorito para generar dióxidos de cloro. La reacción es la siguiente:



Este sistema de aplicación de la electrocoagulación se considera como muy desarrollado, considerando que no será objeto de la investigación contemplada en esta tesis.

## 2.3. Conclusiones previas teóricas sobre la electrocoagulación y la electrofloculación

La electrocoagulación y la electrofloculación son técnicas electroquímicas de tratamiento de agua contaminada, que involucran la adición electrolítica de iones metálicos coagulantes directamente del electrodo de sacrificio a la solución. Estos iones permiten que los contaminantes se aglomeren de la misma forma que si se adicionara un producto químico como podría ser el sulfato de aluminio, cloruro férrico, etc. y permitir con ellos una remoción de los contaminantes. Acompañando a la reacción electrolítica se desarrollan gases en el cátodo, normalmente burbujas de hidrógeno.

La electrocoagulación es una técnica efectiva para desestabilizar coloides en los tratamientos de aguas potables, residuales e industriales. A la vez es un método de tratamiento electroquímico muy prometedor que no requiere adición de reactivos químicos y tiene un futuro importante en la tecnología del tratamiento de agua.

Diferentes estudios demuestran que la eficiencia del tratamiento de agua por electrocoagulación es superior a la coagulación convencional por sulfato de aluminio, removiendo 20% más del carbono orgánico disuelto en el agua a tratar, y se requieren tiempos de contactos cortos en el tratamiento del agua.

La reducción de materia orgánica, incluyendo materia orgánica no biodegradable, es más efectiva, Lo que facilita el tratamiento biológico siguiente

En la electrofloculación o electrocoagulación, el agente floculante o coagulante es introducido como resultado de una reacción en el electrodo y tal proceso permite un control cuidadoso de la cantidad de reactivo introducido en el efluente. Así por ejemplo el  $Al^{+3}$  o  $Fe^{+3}$  puede ser introducido por el uso de un ánodo de hierro o aluminio, siendo también posible usar tal ánodo en una celda de electroflotación. También el hidróxido de magnesio, o incluso iones de hidróxido producido en el cátodo de celdas de cloro o de hipoclorito, puede actuar como agentes floculantes, y se puede admitir la combinación de la coagulación con la cloración.



La adición electrolítica de los iones metálicos tiene una gran ventaja con respecto a la adición de los químicos, por ejemplo: la adición de los iones no aumenta el número de sales en el agua a tratar; este tipo de procedimientos produce la mitad o una tercera parte de lodos; a mayor actividad se requiere una menor cantidad de iones y remover así una gran cantidad de contaminantes.

En la electrofloculación, se favorece la remoción de los contaminantes debido a que son arrastrados por las burbujas de gas que se generan en el sistema ( $H_2$  y  $O_2$ ), por lo que tienden a flotar en la superficie.

Las distintas variables involucradas inducen a tres procedimientos comunes pero a su vez distintas entre sí y son:

**Electroflotación.** Se aprovecha la formación del gas para arrastrar hacia la superficie los contaminantes previamente acondicionados.

**Electrocoagulación-flotación.** Este procedimiento implica la inyección de iones metálicos para aglutinar los contaminantes dispersos en un agua sacrificando directamente a uno de los electrodos (ánodo) complementado con el barrido por arrastre del gas generado.

**Electroquímica.** Debido a las reacciones de oxidación-reducción que se establecen es empleado este procedimiento para desestabilizar contaminantes con baja capacidad digestiva y tóxica para que puedan ser removidos adecuadamente con cualquier procedimiento (principalmente biológico) sin alterarlo.

La aplicación de cada una de las variables mencionadas estará directamente relacionada con el tipo de contaminante a eliminar. Con este tipo de procedimientos incluso se lleva a cabo la desinfección debido a la oxidación anódica.

Se dice que los costos de operación son muchos mas bajos comparados con tecnologías convencionales.

Conocedor de toda esta problemática, y en la búsqueda de nuevos procedimientos más eficaces y más económicos, me he interesado por la investigación en este campo de la electrocoagulación y la electroflotación, tanto en el aspecto científico como en el de investigación de aplicación práctica.

## **2.4. Tecnologías disponibles para el desarrollo de un proceso de electrocoagulación**

De acuerdo con todo lo anterior justifico mi interés por este tema, y considero que mi tesis se basará en una investigación para profundizar en el conocimiento de las tecnologías de electrocoagulación y determinar, en una primera idea, su aplicabilidad al tratamiento de efluentes de secundario con el objetivo de una mejora en la calidad final del agua regenerada para poder fomentar e incentivar su consumo, así como su utilización en los tratamientos de agua y desalinización. Para ello, uno de los trabajos previos más importante será el estudio exhaustivo de tecnologías disponibles, para así poder llegar a diseñar y plantear un esquema de tratamiento, y materializar todo en una planta piloto, que permita justificar, por sus resultados. La aplicación del sistema a los tratamientos y depuración de las aguas.

Según Lee (1996) cuando se disponen varias placas conductoras entre el cátodo y el ánodo, y los electrodos y las placas conductoras se disponen para formar un circuito de flujo de una vía, ascendente, cerrado y con forma de S, las impurezas del agua coagulan formando un conglomerado en un tiempo muy corto, aproximadamente de 1 minuto, si se genera un campo eléctrico con una intensidad suficiente entre los dos electrodos mediante la aplicación de un voltaje apropiado al cátodo y al ánodo.

La posible razón de la existencia de este fenómeno se explica como resultado de que cuando se aplica un voltaje apropiado al cátodo y al ánodo de forma que se genera un campo eléctrico con una intensidad suficiente entre los electrodos, las impurezas y las moléculas de agua de la solución se polarizan bajo el campo eléctrico, es decir, el extremo adyacente al ánodo lleva cargas negativas mientras que el otro extremo adyacente al cátodo lleva cargas positivas.

La función de polarización hace que las impurezas tales como las moléculas de la solución y las microburbujas sólidas, presentes en el volumen de agua, se polaricen convirtiéndose en partículas que llevan alternativamente cargas positivas y cargas negativas. Además, todas las partículas que llevan cargas mutuamente repulsivas o sin carga se convierten en partículas que llevan cargas mutuamente atractivas y, por lo tanto, se produce el fenómeno de coagulación.

Las placas conductoras dispuestas entre el ánodo y el cátodo facilitan la coagulación de las partículas de impurezas, pero sigue sin conocerse el mecanismo de este efecto. Se intuye que el mecanismo puede tener relación con la mejor transferencia de energía debida a la generación de un microcampo eléctrico sobre las propias placas conductoras. Después de la inducción de las impurezas para que lleven cargas bipolares y para conseguir un efecto mutuamente atractivo y un efecto de coagulación adicional, se requieren otros efectos para hacer que las impurezas pequeñas dispersivas choquen entre sí para formar un conglomerado de mayor tamaño que pueda separarse del volumen de agua más fácilmente que uno pequeño. La colisión entre las impurezas puede conseguirse de las siguientes formas:

1. Agitación macroscópica: Las impurezas pueden chocar entre sí en el volumen de agua a través de una agitación mecánica. Las placas conductoras presentes en el depósito de procesamiento pueden disponerse para formar un circuito con forma de S de manera que el volumen de agua pueda fluir de forma invertida bajo un campo eléctrico para conseguir el efecto de agitación mecánica.
2. Turbulencias microscópicas: Las dimensiones de algunas de las impurezas son muy pequeñas, incluso tan pequeñas como una molécula o un estado iónico. La agitación mecánica sólo puede hacer que se desplacen las impurezas macroscópicamente, permaneciendo constante la distancia entre las impurezas pequeñas. En otras palabras, las moléculas de impurezas no colisionarán entre sí para combinarse en un conglomerado. Para solucionar este problema, se utilizan dispositivos que inducen a las impurezas para que lleven cargas, y después aceleran las cargas para formar una corriente unidireccional y generar adicionalmente un campo magnético perpendicular a la dirección del flujo (Lee, 1996). Como cada una de las impurezas separadas forma a su alrededor su propio campo magnético independiente, la interacción entre estos campos magnéticos fuerza a las impurezas a desplazarse de una forma ligeramente lateral a lo largo de la

dirección del campo magnético, y este pequeño desplazamiento lateral se convertirá en un mayor desplazamiento lateral después de un trayecto. Las diferentes impurezas llevan diferentes cargas, de manera que forman a su alrededor diferentes intensidades de campos magnéticos. Por lo tanto, los desplazamientos laterales de las impurezas también serán diferentes, permitiéndose de esta forma la colisión entre las impurezas. Cuando un volumen de agua se mantiene en movimiento en un circuito de flujo en forma de S, las impurezas se aceleran consiguiéndose el desplazamiento espontáneo.

Basándose en las observaciones anteriores, en la presente investigación se pretende, como un objetivo más desarrollar una planta piloto, conforme al método teórico expuesto, para tratar de forma continua un volumen de agua.

## 2.5. Formulación del proceso

La ley de Ohm, aplicado a la electrocoagulación entre placas paralelas rectangulares, de superficie  $A$  y separación  $l$ , puede concretarse en:

$$I = \frac{V}{R} \left[ \frac{\text{Volts}}{\text{Ohms}} \right]$$

$$L = \frac{1}{R} \text{ [Siemens] Conductancia}$$

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Siendo  $\rho$  la resistividad,  $l$  la distancia entre placas, y  $A$  la sección de las placas del electrocoagulador.

El inverso de la ecuación anterior conduce a:

$$L = k \frac{A}{l} \left[ \frac{\text{Siemens} \cdot \text{m}^2}{\text{m} \cdot \text{m}} \right]$$

Siendo  $k$  la conductividad específica del agua a tratar, inverso de resistividad, medida en micro o milisiems/cm.

La corriente óhmica en el electrocoagulador será:

$$I = \frac{V}{R} = V \cdot L = k \frac{A}{l} \cdot V$$

La potencia óhmica disipada será:

$$P_o = \frac{V^2}{R} = V^2 \cdot L = k \frac{A}{l} \cdot V^2$$

Si por el electrocoagulador circula una intensidad medida,  $I_m$ , sometido a una diferencia de potencial medida,  $V_m$ , la potencia total consumida en el electrocoagulador es de:

$$P = P_o + P_e = I_m \cdot V_m$$

Siendo  $P_e$  la potencia consumida debida a la electrocoagulación, de modo que:

$$P_e = P - P_o = I_m \cdot V_m - \frac{V_m^2}{R} = V_m \left( I_m - \frac{V_m}{\frac{l}{k \cdot A}} \right) = V_m \cdot \left( I_m - k \frac{A}{l} V_m \right)$$

Si el electrocoagulador está compuesto por dos tubos concéntricos, de radios  $r_1$  y  $r_2$ , circulando el agua por el espacio anular, en las ecuaciones anteriores, la distancia entre placas ahora será la diferencia de radios, el área ahora es el área media logarítmica de las áreas externa del tubo interior  $A_1$  e interior del tubo externo  $A_2$ , expresado por:

$$A_m = \frac{A_2 - A_1}{\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r}} = \frac{A_2 - A_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

En un experimento de electrocoagulación el electrodo o electrodos suelen estar conectados a una fuente externa de corriente continua. La cantidad de metal disuelto o depositado depende de la cantidad de electricidad que pasa a través de la solución electrolítica. Una simple relación entre la intensidad de corriente ( $A \text{ cm}^{-2}$ ) y la cantidad de sustancia disuelta (M) ( $\text{g de M cm}^{-2}$ ) pueden ser derivados de la ley de Faraday.

$$w = \frac{itM}{nF}$$

Donde,  $w$  es la cantidad de material depositado,  $i$  es la densidad de corriente en ( $A\text{ cm}^{-2}$ ),  $t$  es el tiempo en segundos,  $M$  masa molar del material del electrodo,  $n$  es el número de electrones en la reacción de oxidación/reducción,  $F$  es la constante de Faraday  $96500\text{ C mol}^{-1}$ .

Se espera que haya una concordancia entre la cantidad de sustancias disueltas calculadas, como resultado de paso de una cantidad definida de electricidad y la cantidad determinada experimentalmente. Por lo general, se obtiene una buena concordancia a pesar que puede introducirse errores importantes si no se presta atención a la geometría de ensamblaje de los electrodos, así como las condiciones óptimas de la celda de EC.

El potencial medido es la suma de los tres componentes.

$$\eta_{AP} = \eta_{\kappa} + \eta_{Mt} + \eta_{IR}$$

Donde  $\eta_{AP}$  es el sobrepotencial aplicado en (V),  $\eta_{\kappa}$  el sobrepotencial cinético en (V),  $\eta_{Mt}$  es sobrepotencial de la concentración (V),  $\eta_{IR}$  el sobrepotencial causado por la resistencia de la solución (V).

La caída de la resistencia está relacionada con la distancia ( $d$  en cm) entre los electrodos, área superficial ( $A$  en  $m^2$ ) del cátodo y la conductividad específica de la solución ( $k$  en  $mSm^{-1}$ ) y corriente ( $I$  en A) por la ecuación siguiente:

$$\eta_{IR} = \frac{Id}{Ak}$$

La caída de la resistencia puede ser fácilmente minimizada por la disminución de la distancia entre los electrodos, el aumento de la zona de sección transversal de los electrodos y la conductividad específica de la solución. Sobrepotencial de concentración ( $\eta_{Mt}$ , V), también conocida como la transferencia de masa o sobrepotencial de difusión, es causada por el cambio en la concentración de electrolitos en la proximidad de la superficie de los electrodos debido a la reacción de electrodos. Este sobrepotencial es causado por las diferencias en la concentración de

las especies electroactivas entre el volumen de la solución y la superficie del electrodo. Esta condición ocurre cuando la reacción electroquímica es lo suficientemente rápida para reducir la concentración de las especies electroactivas en la mayor parte de la solución. Un sobrepotencial pequeño debido a la concentración es insignificante cuando la constante de velocidad de reacción es mucho más pequeña que el coeficiente de transferencia de masa. El sobrepotencial debido al transporte de masa ( $Mt \eta, V$ ) se puede reducir por el aumento de la masa de los iones metálicos transportado de la superficie del ánodo a la mayor parte de la solución, que se puede lograr aumentando la turbulencia de la solución. También se puede superar por el paso de la solución electrolítica del ánodo al cátodo a mayor velocidad mediante el uso de algunos medios mecánicos. El sobrepotencial cinético (también llamada potencial de activación) tiene su origen en la energía de activación barrera para las reacciones de transferencia de electrones.

El sobrepotencial de activación es especialmente alto para la generación de los gases en ciertos electrodos. Sin embargo, los efectos de estos cambios no han sido investigados en profundidad para especies específicas en solución acuosa. Se han hecho muy pocos trabajos que caractericen los depósitos en los electrodos.

La densidad de carga aplicada al agua residual puede calcularse utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad de carga } C_F = iT/F V_r \quad (1)$$

La eficiencia de la corriente ( $\epsilon_c$ ) puede definirse como el cociente entre la masa real de hierro ( $[Fe]_R$ ) y la masa teórica del hierro liberado de ánodos ( $[Fe]_T$ ), donde la masa teórica de hierro liberada fue calculada por la ley de Faraday para un sistema monopolar.

$$\epsilon_c = [Fe]_R/[Fe]_T \quad (2)$$

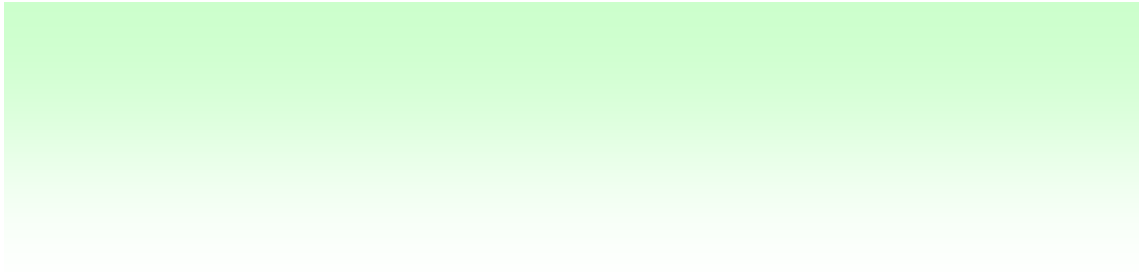
$$[Fe]_T = \frac{i \times \tau \times MW_{Fe}}{Z \times F} \quad (3)$$





---

## **CAP. 3. OBJETIVOS INICIALES DE LA INVESTIGACIÓN**





### **3. OBJETIVOS INICIALES DE LA INVESTIGACIÓN**

A través de diversas publicaciones técnicas analizadas, y sobre todo en la redacción de un proyecto de ejecución que he realizado en relación con la electrocoagulación, se me han presentado una serie de preguntas que deben constituir parte de los objetivos iniciales de esta tesis, objetivos que ya figuraban en la memoria de la investigación propuesta de la solicitud de tesis.

El punto de partida está en la existencia de algunos conocimientos sobre el proceso de electrocoagulación de las aguas, y en que se va considerando como una tecnología utilizable al tratamiento de las aguas potables y residuales, señalándose que se pueden evitar consumos de reactivos químicos, dosificando corriente eléctrica en su lugar.

A la vez se considera que este tipo de instalaciones se materializan en un sistema compacto con buenos rendimientos, e importantes reducciones de costes.

Pero para aplicar adecuadamente este proceso al tratamiento de las aguas, el conocimiento actual presenta importantes lagunas. Falta de información en algunos temas, contradicciones en resultados de investigaciones sobre otros temas, y la falta de justificación de otros temas, indica claramente que existen temas a investigar.

Los objetivos iniciales, que me he planteado en la investigación para esta tesis se pueden concretar en los siguientes puntos y fases:

#### **Fase 1ª**

Esta primera fase es una toma de contacto a través de unos pocos ensayos de choque y tras la lectura previa de algunos artículos publicados sobre la materia. Los objetivos previos en esta primera fase son los siguientes:

- 1.1. Desarrollar un trabajo de investigación, a nivel laboratorio, con el fin de optimizar los parámetros de diseño y extrapolarlo a escala piloto.

- 1.2. Con los resultados obtenidos y las experiencias adquiridas, realizar el diseño y montaje de una planta piloto
- 1.3. Con la investigación previa aumentar el conocimiento fisicoquímico de la electrocoagulación, sobre todo buscando su aplicación práctica. Establecer la influencia, en el proceso, de la intensidad, del voltaje, de la separación de placas y de la densidad de corriente.
- 1.4. Investigar sobre la Influencia de la electrocoagulación sobre parámetros físicos (pH, conductividad)
- 1.5. Investigar sobre la eficacia de la electrocoagulación en la eliminación de turbidez.
- 1.6. Investigar sobre la eficacia de la electrocoagulación en la eliminación la DQO y absorción UV.
- 1.7. Investigar sobre la eficacia de la electrocoagulación en la reducción de aniones (nitratos y sulfatos).
- 1.8. Investigar sobre la eficacia de la electrocoagulación en la eliminación de cationes.
- 1.9. Investigar sobre los efectos de la electrocoagulación sobre las aguas captadas para abastecimiento, procedentes de un embalse de la Comunidad de Madrid y de una zona de aguas duras.
- 1.10. Investigar sobre los efectos de la electrocoagulación sobre aguas residuales depuradas.
- 1.11. Investigar sobre rendimientos de diferentes equipos de electrocoagulación con elementos planos.
- 1.12. Concepción y diseño de una planta experimental a nivel de laboratorio.

## **Fase 2ª**

- 2.1. Adquisición de material necesario para la investigación a escala laboratorio y planta definitiva de investigación.
- 2.2. Puesta a punto del Laboratorio.
- 2.3. Diseño y montaje de reactores a escala de laboratorio.
- 2.4. Ensayos a escala de laboratorio encaminados a estudiar la influencia de las variables que intervienen en el proceso. (Ampliación ensayos de la Fase 1ª).
  - Intensidad eléctrica.
  - Temperatura.

- Materiales de las placas de electrodo y conductoras.

Los estudios realizados en esta segunda fase, al igual que los realizados en la primera fase, serán experiencias en un sistema discontinuo. La influencia del caudal se determinará cuando se disponga de la planta piloto, en la fase 3.

- 2.5. Ensayos a nivel de laboratorio encaminados a determinar el grado de cumplimiento de los sistemas de electrocoagulación, en relación con la normativa actual de reutilización.
- 2.6. Reducción de parámetros físico-químicos de las aguas (SS, turbidez, nitrógeno y fósforo)
- 2.7. Reducción de la contaminación biológica de las aguas.
- 2.8. Ensayos a nivel de laboratorio encaminados a determinar el rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación en relación con la modificación de la dureza del agua.
- 2.9. Ensayos a nivel de laboratorio encaminados a determinar el rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación en relación con la modificación de la conductividad de las aguas efluentes del secundario.
- 2.10. Concepción y diseño definitivo de la planta piloto para desarrollo experimental con caudal circulante en continuo.
- 2.11. Construcción de la planta experimental, realizando gestiones para su instalación en la planta depuradora de aguas residuales de Viveros.

### **Fase 3**

Objetivos propuestos en esta fase con caudal en continuo

- 3.1. Profundizar en el conocimiento de la tecnología de electrocoagulación, estudiando la influencia de las siguientes variables en el proceso:
  - Intensidad eléctrica.
  - Caudal del agua tratada.
  - Tiempo de retención
  - Variación del pH.
  - Temperatura.
  - Materiales de las placas de electrodo y conductoras.

- Combinación de las placas de electrodos y conductoras.
- 3.2. Verificar el grado de cumplimiento de los sistemas de electrocoagulación respecto a las normativas actuales de reutilización.
- Reducción de parámetros físico-químicos de las aguas (SS, turbidez, nitrógeno y fósforo).
  - Reducción de la contaminación biológica de las aguas (E. coli, legionella, presencia de parásitos como nematodos y tenia).
- 3.3. Verificar el rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación en relación con la modificación de la dureza del agua.
- 3.4. Verificar el rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación en relación con la modificación de la conductividad de las aguas efluentes del secundario.
- 3.5. Diseño y construcción de una planta piloto a nivel semiindustrial.
- 3.6. Estudio energético del proceso de electrocoagulación.

Los objetivos que planteo para la investigación bibliográfica, de acuerdo con lo anterior son:

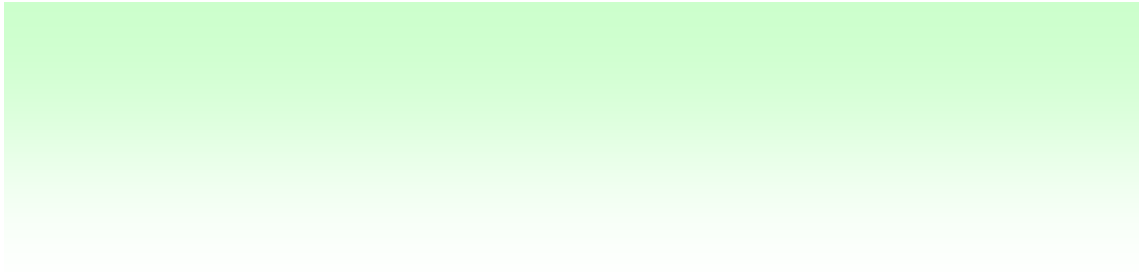
1. Conocimiento fisicoquímico de la electrocoagulación. Con la investigación previa aumentar el conocimiento fisicoquímico de la electrocoagulación, sobre todo buscando su aplicación práctica. Establecer la influencia, en el proceso, de la intensidad, de la conductancia, del voltaje, de la separación de placas, de la densidad de corriente, y determinar el calor generado.
2. Influencia de la electrocoagulación sobre parámetros físicos, como pH, conductividad.
3. Eficacia de la electrocoagulación en la eliminación de turbidez
4. Eficacia de la electrocoagulación en la eliminación la DQO y absorción UV.
5. Eficacia de la electrocoagulación en la reducción de aniones, como nitratos y sulfatos.
6. Eficacia de la electrocoagulación en la eliminación de cationes, como calcio, sodio y potasio.
7. Efectos de la electrocoagulación sobre las aguas prepotables, procedentes de un embalse o cauce fluvial, y de una zona de aguas duras.
8. Efectos de la electrocoagulación sobre aguas residuales depuradas.
9. Rendimiento de diferentes equipos de electrocoagulación, planos y tubulares.

10. Modelización del proceso.
11. Diseño de plantas optimizadas experimentales de electrocoagulación.
12. Estudio energético del proceso.





## **CAP. 4. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA**





## 4. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el apartado anterior, correspondiente al planteamiento de los objetivos iniciales, se han establecido tres fases. La primera se corresponde con la investigación bibliográfica y los ensayos de choque, la segunda con la fase experimental a nivel de ensayos de laboratorio para definir algunos de los parámetros que intervienen en el proceso, y la tercera fase se refiere a la investigación con la planta piloto diseñada, acorde con los resultados de las dos fases anteriores, para dar respuesta a los objetivos fuera de la frontera del conocimiento actual.

Para la búsqueda de la investigación bibliográfica, se han considerado y consultado las siguientes bibliotecas, en: la Facultad de Química de la Universidad Complutense de Madrid, de la E.T.S. I. Industriales, del Ministerio de Medio Ambiente, de la E. T. S. I. Caminos, Canales, y Puertos. Se han encontrado una serie de libros científicos, que tratan el tema de manera general. Igualmente se ha buscado información más específica en revistas especializadas, para ello he acudido, solicitando información, al Centro de Documentación Científica de la UPM.

### 4.1. Preparación de palabras clave para la solicitud

Las palabras claves, con las que se ha realizado la búsqueda, son las siguientes:

<p>Castellano:</p> <p>electrocoagulación, electroflotación, electrolisis, flotación, tratamiento aguas residuales, tratamiento de agua, desmineralización, ablandamiento de aguas.</p>
<p>English:</p> <p>Electrocoagulation, electroflotation, elctrolysis, flotation, sewage treatment plant, treatment plant, demineralization, water softening.</p>
<p>Français:</p> <p>Électrocoagulation, électroflottage, électroflottaison, électrlllyse, flottage, flotación, épuration des eaux, épurateur d'eau, traitement de l'eau, déminéralitation, adoucissement de l'eau.</p>
<p>Deutsch:</p> <p>Elektrokoagulation, Elektroflotation, Elektrolyse, Flotation, Abwasseraufbereitung, Wasseraufbereitung, Demineralisierung, Wasserenthärtung.</p>

*Tabla 4.1. Palabras claves para la búsqueda*

### 4.1.1. Acceso a los bancos de datos

Finalmente he accedido al banco de datos del Centro de Documentación Científica, y Biblioteca Universitaria de la UPM. He realizado la solicitud de la búsqueda bibliográfica con las palabras claves anteriormente citadas.

#### 4.1.1.1. Descripción de la información recibida

- Compendex 1969-2006 electrocoagulation and water treatment (129 artículos)
- Compendex 1969-2006 electrocoagulation and wastewater treatment (106 artículos)
- Compendex 1969-2006 electrocoagulation and water demineralization (1 artículos)
- Compendex 1969-2006 electrocoagulation and electrolysis (43 artículos)
- Compendex 1969-2006 electrocoagulation and flotation (35 artículos)
- ISI Export Format 1991 -2005:
  - (electrocoagulation )and( electrolysis )(25 artículos)
  - (electrocoagulation )and( flotation )(17 artículos)
  - (electrocoagulation )and( water softening )(1 artículos)
  - (electrocoagulation )and( wastewater treatment )(22 artículos)
  - (electrocoagulation )and( water treatment )(84 artículos)
- La búsqueda: ( electrocoagulation )and( electrolysis ) en las bases de datos: GEOBASE 2004/09-2005/08 GEOBASE 2001/12-2004/08, GEOBASE 1997/12-2001/11, GEOBASE 1994-1997/11, ICONDA 1976-2005/08, INSPEC 2005/09 Week 4 2005/09/25-2005/10/01, INSPEC 2005/09 Week 3 2005/09/18-2005/09/24, INSPEC 2005/09 Week 2 2005/09/11-2005/09/17, INSPEC 2005/09 Week 1 2005/09/04-2005/09/10, INSPEC 2005/06-2005/08, INSPEC 2005/01-2005/05, INSPEC 2002-2004, INSPEC 2000/01-2001/12, INSPEC 1998/01-1999/12, INSPEC 1996/01-1997/12, INSPEC 1993/01-1995/12, INSPEC 1990/01-1992/12, INSPEC 1986/01-1989/12, INSPEC 1980/01-1985/12, INSPEC 1969/01-1979/12, Pascal 2005/01-2005/08, Pascal 2004, Pascal 2003, Pascal 2002, Pascal 2001, Pascal 2000, Pascal 1999, Pascal 1998, Pascal 1997, Pascal 1996, Pascal 1995, Pascal 1994, Pascal 1993, Pascal 1992, Pascal 1991, Pascal 1989-1990, Pascal 1987-1988, Transport 2003-2005/06, Transport 1988-2002, Transport Pre-1988. (electrocoagulation )and( electrolysis )(Se recibieron 25 artículos)

La búsqueda: ( electrocoagulation )and( flotation ) en las bases de datos: GEOBASE 2004/09-2005/08, GEOBASE 2001/12-2004/08, GEOBASE 1997/12-2001/11, GEOBASE 1994-1997/11, ICONDA 1976-2005/08, INSPEC 2005/09 Week 4 2005/09/25-2005/10/01, INSPEC 2005/09 Week 3 2005/09/18-2005/09/24, INSPEC 2005/09 Week 2 2005/09/11-2005/09/17, INSPEC 2005/09 Week 1 2005/09/04-2005/09/10, INSPEC 2005/06-2005/08, INSPEC 2005/01-2005/05, INSPEC 2002-2004, INSPEC 2000/01-2001/12, INSPEC 1998/01-1999/12, INSPEC 1996/01-1997/12, INSPEC 1993/01-1995/12, INSPEC 1990/01-1992/12, INSPEC 1986/01-1989/12, INSPEC 1980/01-1985/12, INSPEC 1969/01-1979/12, Pascal 2005/01-2005/08, Pascal 2004, Pascal 2003, Pascal 2002, Pascal 2001, Pascal 2000, Pascal 1999, Pascal 1998, Pascal 1997, Pascal 1996, Pascal 1995, Pascal 1994, Pascal 1993, Pascal 1992, Pascal 1991, Pascal 1989-1990, Pascal 1987-1988, Transport 2003-2005/06, Transport 1988-2002, Transport Pre-1988, se recibieron 17 artículos.

La búsqueda: ( electrocoagulation )and( water softening ) en las bases de datos: GEOBASE 2004/09-2005/08, GEOBASE 2001/12-2004/08, GEOBASE 1997/12-2001/11, GEOBASE 1994-1997/11, ICONDA 1976-2005/08, INSPEC 2005/09 Week 4 2005/09/25-2005/10/01, INSPEC 2005/09 Week 3 2005/09/18-2005/09/24, INSPEC 2005/09 Week 2 2005/09/11-2005/09/17, INSPEC 2005/09 Week 1 2005/09/04-2005/09/10, INSPEC 2005/06-2005/08, INSPEC 2005/01-2005/05, INSPEC 2002-2004, INSPEC 2000/01-2001/12, INSPEC 1998/01-1999/12, INSPEC 1996/01-1997/12, INSPEC 1993/01-1995/12, INSPEC 1990/01-1992/12, INSPEC 1986/01-1989/12, INSPEC 1980/01-1985/12, INSPEC 1969/01-1979/12, Pascal 2005/01-2005/08, Pascal 2004, Pascal 2003, Pascal 2002, Pascal 2001, Pascal 2000, Pascal 1999, Pascal 1998, Pascal 1997, Pascal 1996, Pascal 1995, Pascal 1994, Pascal 1993, Pascal 1992, Pascal 1991, Pascal 1989-1990, Pascal 1987-1988, Transport 2003-2005/06, Transport 1988-2002, Transport Pre-1988, se recibieron 1 registros

La búsqueda: ( electrocoagulation )and( wastewater treatment ) en las bases de datos: GEOBASE 2004/09-2005/08, GEOBASE 2001/12-2004/08, GEOBASE 1997/12-2001/11, GEOBASE 1994-1997/11, ICONDA 1976-2005/08, INSPEC 2005/09 Week 4 2005/09/25-2005/10/01, INSPEC 2005/09 Week 3 2005/09/18-2005/09/24, INSPEC 2005/09 Week 2 2005/09/11-2005/09/17, INSPEC 2005/09 Week 1 2005/09/04-2005/09/10, INSPEC 2005/06-2005/08, INSPEC 2005/01-2005/05, INSPEC 2002-2004, INSPEC 2000/01-2001/12, INSPEC 1998/01-1999/12, INSPEC 1996/01-1997/12, INSPEC 1993/01-1995/12, INSPEC 1990/01-1992/12, INSPEC 1986/01-1989/12, INSPEC 1980/01-1985/12, INSPEC 1969/01-1979/12, Pascal 2005/01-2005/08, Pascal 2004, Pascal

2003, Pascal 2002, Pascal 2001, Pascal 2000, Pascal 1999, Pascal 1998, Pascal 1997, Pascal 1996, Pascal 1995, Pascal 1994, Pascal 1993, Pascal 1992, Pascal 1991, Pascal 1989-1990, Pascal 1987-1988, Transport 2003-2005/06, Transport 1988-2002, Transport Pre-1988. Se recibieron 22 artículos.

La búsqueda: ( electrocoagulation )and( water treatment ) en las bases de datos: GEOBASE 2004/09-2005/08, GEOBASE 2001/12-2004/08, GEOBASE 1997/12-2001/11, GEOBASE 1994-1997/11, ICONDA 1976-2005/08, INSPEC 2005/09 Week 4 2005/09/25-2005/10/01, INSPEC 2005/09 Week 3 2005/09/18-2005/09/24, INSPEC 2005/09 Week 2 2005/09/11-2005/09/17, INSPEC 2005/09 Week 1 2005/09/04-2005/09/10, INSPEC 2005/06-2005/08, INSPEC 2005/01-2005/05, INSPEC 2002-2004, INSPEC 2000/01-2001/12, INSPEC 1998/01-1999/12, INSPEC 1996/01-1997/12, INSPEC 1993/01-1995/12, INSPEC 1990/01-1992/12, INSPEC 1986/01-1989/12, INSPEC 1980/01-1985/12, INSPEC 1969/01-1979/12, Pascal 2005/01-2005/08, Pascal 2004, Pascal 2003, Pascal 2002, Pascal 2001, Pascal 2000, Pascal 1999, Pascal 1998, Pascal 1997, Pascal 1996, Pascal 1995, Pascal 1994, Pascal 1993, Pascal 1992, Pascal 1991, Pascal 1989-1990, Pascal 1987-1988, Transport 2003-2005/06, Transport 1988-2002, Transport Pre-1988. Se recibieron 84 artículos

#### **4.1.1.2. Documentación seleccionada**

Se han recibido 612 comunicaciones de artículos referentes a las palabras claves, se han seleccionado los artículos que tenían alguna relación con los objetivos previos de la presente investigación. En el anejo bibliográfico, y en lo que sigue, se mencionan los trabajos más importantes, que se han seleccionado y considerado en la presente investigación.

Se ha realizado igualmente una búsqueda exhaustiva vía Internet, utilizando diferentes buscadores, y encontrando información referente al tema de la investigación.

## **4.2. Investigación de la documentación recibida**

Para facilitar el seguimiento de la tesis, esta investigación aparece en el anejo bibliográfico, Anejo nº 1. A continuación solo aparece un resumen de lo más significativo.

### 4.3. Resumen de la investigación sobre la documentación recibida

Como resumen del análisis de la documentación bibliográfica, pueden concretarse los resultados o respuestas a los objetivos planteados en:

Objetivo	Autores	Datos de interés
En relación con el primer objetivo. "Conocimiento proceso"	Chen G.	<p>Electrodeposición</p> <p>Electroflotación (E.F). Eliminación grasas, flóculos ligeros y proceso de flotación</p> <p>Electrocoagulación (E.C). Origina Sales de Al, Fe y otros en el ánodo. H en el cátodo</p> <p>Electro-oxidación. Para degradar contaminantes refractarios.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cadenas Al-O y Al-OH eficaces para eliminación de fluor</li> <li>• Concentraciones altas de <math>Ca^{2+}</math> y <math>Mg^{2+}</math> recomiendan cátodos de acero inoxidable</li> </ul>
	Mollah et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Burbujas de <math>O_2</math> en ánodo y H en cátodo</li> <li>• Eliminación de metales depende de la densidad de corriente, Ley de Faraday</li> <li>• Caída de resistencia depende de distancia entre placas, superficie y conductividad.</li> </ul>
	Paul A.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para minimizar resistencia usar soluciones con alta conductividad, disminuir distancia entre electrodos, optimizar geometría de los electrodos</li> <li>• Minimizar acumulación de <math>O_2</math> y H en electrodos</li> <li>• Evitar obstáculos entre electrodos</li> </ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
	Lee M.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colocar placas formando circuitos en S para lograr coagulación en poco tiempo (1m)</li> <li>• Las acciones del proceso son: oxidación de impurezas en la solución; reducción de impurezas en cátodo; electrofóresis; ataque electroquímico (iones metálicos, voltaje y conductividad adecuados); electrolisis; polarización.</li> <li>• No se conoce el efecto de placas conductoras entre electrodos</li> <li>• Para lograr una buena floculación se precisa agitación macroscópica y turbulencias microscópicas,</li> <li>• Intensidad entre 0'5 mV y 1000 V/cm</li> <li>• Se consiguen efectos con independencia del pH de las aguas</li> <li>• Conductividad adecuada entre 0'98 y 254 micro Siemens por cm.</li> <li>• Para concentración de partículas superior a 105 ppm, usar tratamientos previos.</li> </ul>
	Picard T., et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trabaja con cátodo de acero inoxidable</li> <li>• El H formado se debe solo a la reacción electroquímica</li> </ul>
	Mollah M. Y., et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Influyen en la E.C : pH, tamaño de partículas, concentración de sales</li> <li>• Con ánodo de Al, con pH adecuado se generan <math>Al(OH)_3</math></li> </ul>
	Alsheyab M., et al.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Con ferratos se eliminan: oxisulfuros, <math>SH_2</math>, tioacetamidas</li> <li>• Se eliminan metanol y fenol, pasando a <math>Cl_2</math> y <math>H_2O</math></li> <li>• Se oxidan los cianuros</li> <li>• Se logra una desinfección del 99,9% de coliformes, y la inactivación de virus, por los ferratos en solución alcalina de NaOH o de KOH</li> </ul>



Objetivo	Autores	Datos de interés
<p>En relación con el segundo objetivo.</p> <p>“Efectos sobre parámetros físicos como: pH, conductividad”</p>	Chen Guohua	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Con altas intensidades los efectos de electrocoagulación son bajos, generando pérdidas importantes en calor</li> <li>• Densidades de corriente adecuadas de 20 a 25 A/m<sup>2</sup>, dependiendo del pH, T °C, caudal</li> <li>• La utilización de ánodo de aluminio genera unos rendimientos de eliminación del 140%, frente a un 100%, utilizando Fe</li> <li>• El rendimiento se elevaría hasta un 160%, si se aplican sonidos de baja frecuencia</li> <li>• La calidad del agua tratada depende de la cantidad de iones de Al o Fe producidos, de la densidad de carga, del producto de intensidad de corriente por tiempo (A·h)</li> <li>• Los iones cloruro reducen el efecto adverso del HCO<sub>3</sub> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, en relación con el proceso</li> <li>• La existencia de HCO<sub>3</sub> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, lleva a la precipitación de Ca<sup>2+</sup> o Mg<sup>2+</sup></li> <li>• Para asegurar el proceso debe haber un 20% de Cl<sup>-</sup>, a la vez que se reduce el voltaje necesario</li> <li>• Con electrodos de aluminio, se puede trabajar en condiciones ácidas o alcalinas, pero el óptimo sería con pH=7</li> <li>• Con conductividad alta, el pH no tiene un peso significativo</li> <li>• Utilizando electrodos de Fe, con pH alcalino se logran los mejores rendimientos en la eliminación de color y DQO</li> <li>• Con temperaturas altas, los poros del gel formado son más pequeños, y la densidad del flocúlo mayor</li> <li>• Con temperatura alta se necesitan más bajos consumos energéticos</li> <li>• La densidad de corriente debe sobrepasar la diferencia de potencial de equilibrio, el sobrepotencial del ánodo, el sobrepotencial del cátodo y el sobrepotencial de la solución</li> <li>• Normalmente se utiliza corriente continua, debiendo alternar la dirección de la corriente a intervalos de 15 minutos para evitar la pasivación de los electrodos de Al</li> </ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
	Chen G., et al.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trabaja con placas de aluminio, como electrodos, con separación de 4 mm</li> <li>• Recomienda también ánodo de titanio y cátodo de acero inoxidable para aguas de restaurantes</li> <li>• Se disuelven 9 g de Al en cada ánodo de una unidad de electrocoagulación bipolar, con una densidad de carga de 1,87 faradios por metro cúbico de agua, o superior. Con pH=6,94, 30,4°C y Tr=15 minutos, los rendimientos obtenidos son: 67%, 97% y 90% para la DQO, grasas y SS respectivamente. Densidad de carga de electroflotación 0,93 faradios/m<sup>3</sup> de agua</li> <li>• Con densidad de carga fija, Tr= 4,3 min., se han logrado rendimientos de hasta 88%, 99%, y 98%, respectivamente</li> <li>• La modificación del pH se hace con hidróxido sódico o sulfúrico.</li> <li>• Con rango del pH entre 2,6 y 10, la eliminación de grasas fue del 98%</li> <li>• Baja la reducción de SS para pH inferior a 4</li> <li>• Baja la reducción de la DQO para pH inferior a 3 ó superior a 9</li> <li>• Se ajustó la conductividad con Na Cl</li> <li>• No se demuestra variación significativa, en los rendimientos, variando la conductividad entre 498 y 4650 micro Siemens por cm. Los voltajes pasan respectivamente de 6,2 a 1,8 V, en electrocoagulación, y de 9,9 a 3,9 en electroflotación</li> <li>• La densidad de carga es un factor de primera importancia</li> </ul>
	Chen X., et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investiga sobre la influencia del voltaje en el proceso de electrólisis</li> </ul>
	Merzouk B., et al.,	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los ensayos se realizaron con pH del agua residual entre 3,16 y 9,0. A pH 3,16 obtuvieron una eliminación pobre del color, aumentando el pH a 4,1 a 9,0 han alcanzado una eficacia de eliminación del color en un 80 a 90%. La máxima eficacia estuvo entre pH 6,15 – 9,0.</li> </ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
<p>En relación con el tercer objetivo.</p> <p>“Eficacia de la electrocoagulación en la eliminación de turbidez”</p>	M. Pouet et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Señala rendimientos en turbidez del 90%</li> </ul>
	Jung S., et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es fundamental que la concentración de SS se coloque por debajo de 10 mg/l, en aguas de tintes</li> <li>• Si después de la electrocoagulación se somete a un proceso de electrólisis, no influye la concentración de SS</li> </ul>
	Song J., et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los ensayos se realizaron con agua preparada con caolín, de baja turbidez de 8 a 10 NTU, y de alta de 180 a 190 NTU. El pH se mantenía entre 6,8 y 7,3; la temperatura entre 15 y 18°C; Placas de aluminio; distancia entre electrodos de 0,5 cm; 24 V, Tiempo de electrólisis de 60 seg. Tiempo de floculación 20m. Mejores resultados con 5 minutos de floculación y 30 minutos de sedimentación. Rendimiento del 90%</li> </ul>
	Chou W.-L., et al.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Con electrodos de Fe y agitador magnético, diferencia de potencial de 20V, conductividad de 100 a 200 micro Siemens por cm, turbidez de 200 a 300 NTU, DQO de 300 a 600 mg/l y ST de 4000 a 5000 mg/l, SS 10 a 20 mg/l. Los investigadores tratando agua residual que tenía un pH de 8 – 9, conductividad de 100 – 200 µS/cm, turbidez de 200 – 300 NTU, han alcanzado una eficiencia de la turbidez, en más del 90% en menos de 20 minutos de tiempo de electrólisis para concentraciones de 200 y 300 mg/l de cloruro de sodio, con el fin de aumentar la conductividad. Concluyen que un exceso de NaCl puede ser perjudicial para la eliminación de la turbidez.</li> </ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
	Bukhari Alaadin A	<ul style="list-style-type: none"><li data-bbox="759 293 1375 629">• Utilizando placas de acero inoxidable, con separación de 3 cm. pH de 6,9 a 7,1, conductividad 4000 micro Siemens por cm, cloruros 1238 mg/l, DBO de 51 a 58 mg/l, SST de 126 a 160 mg/l, y turbidez de 49 a 53 NTU, aguas urbanas. Ha logrado una reducción de la turbidez de 51 NTU a 3,4 NTU, trabajando con una intensidad de corriente de 0,8 A, y 5 minutos de contacto. Reducción de la DBO del 99%</li><li data-bbox="759 636 1375 719">• La eficacia depende del hierro generado. Con 14,5 de Fe el 82%, y con 28,9 de Fe el 88-92%.</li><li data-bbox="759 725 1375 813">• Se observa la oxidación de iones cloruros, que pasan a cloro gas</li></ul>



Objetivo	Autores	Datos de interés
	<p data-bbox="459 293 624 320">Tezcan Ú., et al.,</p> <p data-bbox="459 734 644 761">Sanchez C. L., et al</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="759 293 1366 365">• Ensayos con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y policloruro de aluminio como coagulante</li> <li data-bbox="759 383 1366 629">• Han estudiado la eliminación de la DQO de las aguas residuales de molino de oliva, y han encontrado que el electrodo de Fe fue más eficiente que el de Al debido a la mejor eficiencia y al menor consumo de energía. La eficiencia de remoción de DQO fue del rango de 62-86%, con una densidad de corriente entre 20-75 mA cm<sup>-2</sup>.</li> <li data-bbox="759 647 1366 719">• Costo de la electrocoagulación de 0,18 a 6,75 €/ kg de DQO eliminado</li> <li data-bbox="759 736 1366 1198">• Han realizado un estudio sobre tratamiento de residuos de aceite soluble de alta DQO. Separación de los electrodos de 5 a 12 mm. Caudal 2l/h. Recirculación 6L/h. Densidad de corriente 20,8 a 62,5 mA/cm<sup>2</sup>, corresponde con 1 a 3A. Tiempo de retención hasta 32 minutos. Los resultados obtenidos fueron muy buenos con una reducción de la DQO de 79,7%; mientras que a nivel laboratorio fue de 66,1%, bajo condiciones similares de operación. La corriente aplicada varió hasta 32 A, con una variación de aluminio disuelto de 0,5 a 1,5 g/l.</li> <li data-bbox="759 1216 1366 1462">• De los datos de ambas experiencias a nivel laboratorio y piloto, sirvió para el diseño a escala industrial. Dicha planta trató una mezcla de aceites solubles con una DQO de 230.000 mg/l y SS de 12.000 mg/l. El caudal tratado fue de 5000 m<sup>3</sup>/año. La eficiencia que han alcanzado fue de 94% para la DQO.</li> <li data-bbox="759 1480 1366 1597">• Potencia consumida proporcional al voltaje establecido. Se añadió Na Cl para incrementar la conductividad hasta 3g/l.</li> <li data-bbox="759 1615 1366 1686">• Al separar los electrodos los rendimientos en DQO disminuyen, pero aumentan los de SS.</li> </ul>







Objetivo	Autores	Datos de interés
	Zongo I., et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Observaron que los niveles de DQO y de absorbancia se iban reduciendo a lo largo de la experimentación hasta su límite final para altas cantidades de coagulante. Concluyen que la DQO no puede ser eliminada totalmente por electrocoagulación, y parece ser que este tratamiento tiene su máxima eficiencia para concentraciones de iones metálicos por encima de 500 ppm para aluminio y 700 ppm para hierro.</li> <li>• Sostienen que la DQO remanente no depende de la naturaleza de los electrodos sino del origen de los residuos, así, la eliminación de la DQO del agua residual de la depuradora fue de un 88% con ambos electrodos y la eliminación de la DQO de la planta textil fue de un 74% con electrodos de hierro y un 78% con electrodos de aluminio. Respecto a la absorbancia, a 436 nm observaron una reducción del aspecto coloreado y que el nivel de la absorbancia tendía a cero por la cantidad de metal disuelto mayor que los indicados anteriormente.</li> <li>• Consumo energético, para aguas con 1000 ppm de DQO, 1,75 kwh/m<sup>3</sup>, con electrodos de aluminio. Puede reducirse el consumo en un 30%, aumentando la conductividad con 1g/l de NaCl</li> </ul>
	Kabdash I., et al.,	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Han estudiado la eliminación del color y DQO de aguas residuales de baño de tinte mediante electrocoagulación, usando electrodos de acero inoxidable y aluminio. Han observado que usando electrodos de acero inoxidable obtienen buenos resultados en la eliminación del color, mientras que con electrodos de aluminio la eliminación del color fue muy limitado (20%). En relación a la eliminación de la DQO, con acero inoxidable y aluminio la reducción de la DQO dependía del tipo de tinte, y adicionando NaCl mejoraba la eliminación hasta un 54% con electrodos de acero inoxidable y un 59% con electrodos de aluminio.</li> </ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
	Zaied M., et al	<ul style="list-style-type: none"><li data-bbox="759 293 1375 766">• Sostienen que la electrocoagulación es una técnica efectiva, rápida y económica para el tratamiento del licor negro procedente de la industria de papel. Los resultados obtenidos, han sido que para este tipo de efluentes con electrodos de aluminio se logran buena eliminación de la DQO (98%), del color (&gt; 99%) y de polifenoles (92%), bajo las siguientes condiciones óptimas: pH inicial 7, t = 50 minutos, densidad de corriente <math>j = 14 \text{ mA cm}^{-2}</math>. El pH final del licor tratado fue cercano al neutro lo cual permite su descarga directamente a la corriente acuática.</li></ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
<p>En relación con el quinto objetivo.</p> <p>“Eficacia de la electrocoagulación en la reducción de aniones (nitratos y sulfatos)”</p>	<p>Prasanna D. B., et al</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Han estudiado la desnitrificación de agua subterránea por electroquímica, usando como materiales de electrodos aluminio, grafito, hierro y titanio. Con electrodos de aluminio, de hierro y de titanio han obtenido una reducción de nitrato del 70 – 97 %, mientras que con electrodos de grafito la reducción fue solamente del 8 %. El nitrato fue transformado a amoníaco con electrodos de aluminio y hierro, pero con electrodos de titanio el nitrógeno fue aparentemente el producto final más importante.</li> <li>• Conclusiones</li> <li>• Las conclusiones a que han llegado los investigadores son:</li> <li>• El hierro y el aluminio mayormente transforma el nitrato a amoniaco, mientras que el titanio transforma el nitrato a nitrógeno.</li> <li>• Fuertes condiciones de reducción (bajo potencial de oxidación-reducción) favorece la formación de amoniaco, mientras que la formación del nitrógeno y otros óxidos ocurre a bajas condiciones de reducción (alto potencial de oxidación-reducción).</li> <li>• La transformación de nitrato a nitrógeno depende en gran parte del material del electrodo utilizado..</li> <li>• La eliminación electroquímica del nitrato, a las concentraciones estudiadas siguen la ecuación de velocidad de primer orden.</li> <li>• Con electrodos de Fe, Al y Ti se consiguen rendimientos de hasta el 80%, con densidad de corriente 140 mA/cm<sup>2</sup>, Tr de 5horas</li> <li>• Se necesita 1 culombio de carga por cada 0,005 mg de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> eliminado</li> <li>• El paso de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> a amoniaco se consigue en condiciones reductoras con bajo potencial de oxidación reducción</li> </ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
	<p data-bbox="459 286 660 315">Szpyrkowicz L., et al</p> <p data-bbox="459 640 632 669">Irdemez S., et al.,</p>	<ul data-bbox="759 286 1382 1608" style="list-style-type: none"> <li data-bbox="759 286 1382 510">• Desarrollan procedimientos para reducir la concentración de nitratos en aguas por debajo de los límites de 15 y 50 mg/l, utilizando electrodos de diversas aleaciones a base de paladio-cobre y catalizadores Ti/Pd-Co.</li> <li data-bbox="759 510 1382 629">• Han encontrado que con electrodos de Ti/Pd-Co cobreados consiguieron rebajar la concentración de nitratos desde 200 a 50 mg/l.</li> <li data-bbox="759 629 1382 898">• Han desarrollado un modelo estadístico para la eliminación de fosfatos con el fin determinar las condiciones óptimas de operación, como son: la concentración inicial de fosfato, el pH inicial de las aguas residuales, la concentración del soporte electrolítico, el tipo de electrolito y la densidad de corriente.</li> <li data-bbox="759 898 1382 1200">• Con concentración de fosfatos de 50 a 5000 mg/l, pH de 4 a 7, concentración de electrolito de 0 a 10 mM (Na Cl, Na NO<sub>3</sub>, NaSO<sub>4</sub>, Ca Cl<sub>2</sub>), densidad de corriente 0,25 a 1,00 mA/cm<sup>2</sup>, 6 pares de electrodos, distancia de electrodos 5 mm, unidad de electro agitación agitada a 1500 r.p.m., volumen tanque 850 ml, densidad de corriente 1,00 mA/cm<sup>2</sup></li> <li data-bbox="759 1200 1382 1608">• Para un tiempo de reacción constante de 25 minutos, los autores han encontrado que las condiciones óptimas de los parámetros fueron: concentración inicial del fosfato de 50 mg/l, 4,5 mM de NaCl y 1,00 mA/cm<sup>2</sup>. A estas condiciones, encontraron que la eficiencia de eliminación pronosticada y experimental de fosfatos de las aguas residuales por electrocoagulación con electrodos de placa de aluminio fueron 99,9 y 100,0%, respectivamente.</li> </ul>





Objetivo	Autores	Datos de interés
	Vivek Narayanan N., et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensayaron con electrodos de hierro y aluminio, con adición de carbón activo. Sostienen que la mayor eficiencia de eliminación más eficaz del cromo (VI) se puede lograr a pH inicial cercano a 8.</li> <li>• La eliminación del cromo (VI) durante electrocoagulación se debe al efecto combinado de la precipitación química, coprecipitación, y arrastre por coagulación y adsorción.</li> <li>• Aumentando la densidad de corriente de 6,7-26,7 mA/cm<sup>2</sup> y el tiempo de funcionamiento de 20 a 100 min, se incrementa la tasa de rendimiento en la concentración de iones metálicos.</li> </ul>
	Parga J. R., et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para la eliminación de arsénico, utilizando electrodos de acero al carbono, han alcanzado una eficiencia de eliminación de más del 99% de compuestos de arsénico (III) y arsénico (V) de las aguas subterráneas analizadas. Observaron que después de la electrocoagulación el arsénico residual en el agua fue de 0,002 ppm con un pH final de 8,5 y una conductividad final entre 500 y 2000 <math>\mu</math>S, voltaje de 20 a 30 V, intensidad de corriente 5 A.</li> <li>• Costo energético 0,002 pesos mejicanos por metro cúbico de agua tratada</li> </ul>
	Kumar R. P., et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilizando electrodos de electrodos de hierro, aluminio y titanio, en la eliminación de arsenitos y arseniatos de las aguas. Densidad de corriente de 0,65 a 1,53 mA/cm<sup>2</sup>, Encontraron que la eliminación de arsénico más eficiente fue con los electros de hierro, llegando a rebajar la concentración de arsénico por debajo de 10 <math>\mu</math>g/l. Han observado que variando las densidades de corriente de 0,65 a 1,53 mA/cm<sup>2</sup>, alcanzaban una rápida eliminación de arsénico en Tr de 5 minutos. En relación al pH observaron que la eliminación de arsénico no tiene influencia en el rango de 6 a 8. Reducción del 97 al 99%.</li> </ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
	Hansen H. et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>Realizaron un ensayo preliminar del proceso de electrocoagulación en un depósito de sedimentación con modificación del flujo, y oxidando con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, lograron eliminar un 98 % arsénico de una solución que contenía 100 ppm de arsénico usando electrodos de hierro. Observaron que en rangos de pH 4-10 predomina el As(V) presentando una carga neta negativa. Las especies As(III) no tienen carga neta. En base a esto los investigadores sostienen que la eficiencia de eliminación del As(V) debe ser mayor que los aniones del As(III). Por lo tanto indican que para incrementar la eliminación del As fue necesario oxidar el As(III), a As(V).</li> </ul>
	Hansen H. K., et al.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Encontraron que para facilitar la eliminación del arsénico por electrocoagulación el arsenito As (III) fue oxidado a arseniato As (V), mediante la introducción de aire. La solución de As (V) fue introducido a un reactor de flujo continuo y los experimentos han demostrado que la eficiencia de eliminación de una solución de 100 mg de As (V)/l fue de más del 98% para una densidad de corriente de 1,2 A/dm<sup>2</sup>, y un tiempo de residencia de alrededor de 9,4 minutos con un caudal de 3 l/h.</li> </ul>
	Mollah M. Y., et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>sostienen que se pueden eliminar iones de Cr<sup>6+</sup> (CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), por la técnica de electrocoagulación usando ánodos de sacrificio de hierro o aluminio. Han encontrado que la eliminación de los metales pesados mediante el proceso de electrocoagulación también fue por adsorción y absorción a los hidróxidos poliméricos de Al<sup>3+</sup> o Fe<sup>3+</sup>.</li> </ul>



Objetivo	Autores	Datos de interés
	Zongo I., et al	<ul style="list-style-type: none"><li>Han estudiado la eficiencia y el comportamiento de los electrodos de Al y Fe en el tratamiento de Cr (VI) que contienen las aguas residuales. Observaron que con electrodos de aluminio con separación de 20 mm, el Cr (VI) se eliminaba más rápido mediante la aplicación de altas densidades de corriente de 50 a 200 A/m<sup>2</sup>, y que con electrodos de hierro la eliminación por precipitación del Cr (III) generado, puede deberse en particular a la presencia del coagulante Fe(OH)<sub>3</sub>, a un pH por debajo de 9, donde el cromo trivalente se encuentra también en la forma de hidróxidos catiónicos. Sostienen que, la eliminación del Cr (VI) con electrodos de hierro puede ser modelado satisfactoriamente teniendo en cuenta las reacciones químicas del Fe (II) electrogenerado, debido a la oxidación por el oxígeno del aire, y la reducción electroquímica de Cr (VI) en el cátodo de hierro.</li></ul>
	Heidmann I., et al	<ul style="list-style-type: none"><li>Han evaluado el rendimiento de un sistema de electrocoagulación con electrodos de hierro para la eliminación del Cr (VI) de las aguas residuales. Encontraron que el Cr disminuyó sólo ligeramente con el tiempo de coagulación a altas corrientes (1.0-3.0 A), mientras que a bajas corrientes (0.05-0.1 A) 10 mg/l de Cr fue removido por completo de la solución después de 45 min. Concluyen que a corrientes por debajo de 0,1 A hacen que el proceso sea eficiente, y además, otros costos podrían reducirse por la disminución de la corriente aplicada y ampliando el tiempo de retención.</li></ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
<p>En relación con el séptimo objetivo.</p> <p>“Efectos de la electrocoagulación sobre las aguas prepotables”</p>	Ghernaout D., et al.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Han estudiado la electrocoagulación como tratamiento de electrodesinfección de dos aguas sintéticas conteniendo cepas de E. Coli y utilizando electrodos de acero corriente, de acero inoxidable y de aluminio, con separación entre placas de 5cm. Observaron que al aumentar la intensidad de corriente de 0,1 A a 1 A, la reducción de la concentración de células de E. Coli medidos en absorbancia fue de 80% a 98% usando electrodos de acero corriente con un tiempo de electrocoagulación de 35 minutos. En relación al pH, encontraron que a pH ácido (pH = 2) la eliminación de la concentración de E. Coli fue de un 29%, a pH neutro fue de 98% y a pH alcalino (pH = 9) fue del 100% con un tiempo de retención de 20 minutos y 1 A, con electrodos de acero corriente. Los resultados han mostrado que, los electrodos de aluminio han sido más eficientes en la destrucción de E. Coli, en comparación con electrodos de acero inoxidable y acero corriente. Solo 30 minutos han sido requeridos para eliminar totalmente las células de E. Coli. La electrocoagulación muestra similares eficiencias en la eliminación de algas y coliformes totales en las aguas superficiales estudiadas.</li> </ul>
	Jiang J., et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mediante un proceso electrocoagulación – flotación con electrodos de aluminio han tratado agua superficial del río Thames, encontrándose que aparentemente la eficiencia del Al(III) ocurrió a pH 6,5 y 7,8. La energía eléctrica consumida en el reactor para el tratamiento del agua potable fue bajo alrededor de 20 kWh/ (kg Al)-1 para una densidad de corriente de 10 a 20 A m<sup>-2</sup>. La eficiencia del tratamiento de agua por electrocoagulación fue superior al tratamiento por coagulación convencional con sulfato de aluminio, removiendo 20% más del carbono orgánico disuelto en el agua a tratar. Los resultados obtenidos con ambas tecnología fueron similares en la eliminación del color ,que fue de un 20% y para el UV-abs 254 un 14%, trabajando a un pH de 6,5.</li> </ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
	Jia –Qian, Nigel Gram et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trabajaron con electrodos de aluminio, con tanque de decantación posterior y de flotación. Ánodo de Al y cátodo de acero inoxidable. La máxima eficacia se conseguía con pH entre 6,5 y 7,8. Consumo de energía 20kwh/kg de Al.</li> <li>• Densidad de corriente 10 a 20 A/m<sup>2</sup>, remoción de SS un 20% superior a la coagulación química</li> <li>• Con pH de 6, se eliminaba color en un 20%</li> </ul>
	Holt P., et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Examinaron e identificaron conceptualmente las interacciones entre la electroquímica, coagulación y flotación enfocado a la electrocoagulación, en la experimentación se eliminaron sólidos en suspensión. Realizaron un análisis matemático basado en el modelo de agua blanca para el proceso de flotación con aire disuelto.</li> </ul>
	Kerwick M. I., et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestran estudios y experiencias sobre desinfección electroquímica como alternativa a la desinfección con cloro. Utilizaron electrodos de platino y acero. Tr de 120 minutos, voltaje 5 V. Con fosfatos se produce ensuciamiento de los electrodos. Las experiencias han sido efectivas sobre Clostridium perfringens, Escherichia coli y Cryptosporidium parvum, siendo más efectiva para aguas que contenían cloruros, la reducción de E. coli y el bacteriofago MS2 fue de cuatro décadas logarítmicas.</li> </ul>
	Yang J., et al.,	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Han tratado agua y muestras de sedimento del río Hui conteniendo ácido fúlvico, los resultados obtenidos muestran que usando electrodos de fibra de carbón activo con una pieza de hierro fijado en el ánodo a 20 V y durante 60 minutos de tratamiento la eliminación del ácido fúlvico es casi del 100% de rendimiento.</li> </ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
	Kimbrough D., et al	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mediante el sistema de electrocoagulación, usando como cátodo 3 electrodos de varillas de carbono y como ánodos 3 varillas de titanio revestido con óxido de rutenio y óxido de titanio, han tratado agua de bebida conteniendo ~ 200 µg/l de bromuro y pequeñas cantidades de trihalometanos (THMs), formados por la interacción de la materia orgánica natural con bromuro y cloro. Han visto que el bromuro era oxidado por electrólisis a bromo y luego volatilizado. Sostienen que esta técnica puede ser útil para otros subproductos de desinfección, así como el ácido haloacético y bromatos.</li></ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
	Ming Shing Lee	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sostiene que cuando se ejecuta un procedimiento electroquímico, se producen simultáneamente seis funciones básicas entre los dos electrodos y en la solución electrolítica: (1) oxidación, (2) reducción, (3) electroforesis, (4) ataque electroquímico, (5) electrólisis, (6) polarización. Normalmente las técnicas de electrocoagulación utilizan las 5 funciones anteriores, y además dicen que otras técnicas con flotación tienen mayor consumo de energía y largos tiempos de tratamientos. Ha descubierto que la sexta función mencionada anteriormente, puede hacer que las moléculas de las impurezas del agua coagulen en tiempos muy cortos (ejemplo 1 minuto), con las ventajas de bajo consumo energía y bajo mantenimiento. Para ello el invento creado dispone varias placas conductoras entre el cátodo y el ánodo, y todos ellos ubicados de tal manera que forma un circuito de flujo de una vía ascendente, en forma de S y cerrado.</li> <li>• Con placas de Al, densidad de corriente 1,67 A, 150 V, ha pasado de 945 mg/l de DQO y 170 mg/l de SS a 82mg/l y 5 mg/l, respectivamente.</li> <li>• Con tintes, utilizando placas de Fe, densidad de corriente de 1,67 A, 200 V, ha logrado reducir a 120mg/l de DQO y 5mg/l de SS.</li> <li>• Con pulpa de papel, utilizando electrodos de Al, 6 A/m<sup>2</sup>, 200 V, logra rebajar cargas de 1010 mg/l de DQO y 120 mg/l de SS a 120 y 5 mg/l, respectivamente. Con electrodos de Fe, 5,5 A/m<sup>2</sup>, 50 V, logra bajar a 120 y 5 mg/l</li> <li>• En vertidos de la industria de acabados mecánicos, con electrodos de Ti revestidos de platino, y placas conductoras de Fe, con 170 V, intensidad del campo eléctrico 8,5 A/cm<sup>2</sup>, pH=6,8 y conductividad 84 micro Siemens por cm, ha logrado reducciones del 99,97% en DQO, del 99,99 en SS, del 98,87% en grasas, del 99,92% en Fe, bajando los coliformes totales de 2,6-10<sup>5</sup> NMP/100 ml a 2 NMP/100 ml.</li> </ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
	Bennajah M., et al	<ul style="list-style-type: none"><li>• Para la eliminación del fluor han utilizado un reactor airlift innovado como celda de electrocoagulación /electroflotación con electrodos de aluminio. Trabajando a condiciones óptimas han logrado reducir de las concentraciones de fluoruro de 10 y 20 mg/l a menos de 1,5 mg/l en el agua a tratada. Concluyen que, la defluorización podría lograrse a un menor consumo de energía y de electrodos a condiciones óptimas como: densidad de corriente de <math>j = 6 \text{ mA/cm}^2</math>, y a pH 5. Otra ventaja de los reactores airlift es que se recuperan los flóculos sólo por flotación, lo que evita la necesidad de un tanque de decantación debajo del reactor. Los experimentos usando electrocoagulación en continuo fueron también prometedores para una aplicación futura al tratamiento de agua potable.</li></ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
<p>En relación con el octavo objetivo.</p> <p>“Efectos de la electrocoagulación sobre aguas residuales depuradas”</p>	<p>Pouet M. F. et al.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sostienen que el proceso de electrocoagulación es una buena alternativa para el tratamiento de aguas residuales urbanas. Han investigado sobre el proceso de electrocoagulación con flotación con aire disuelto (proceso DAF) en el tratamiento de aguas residuales, usando electrodos de aluminio en un número de placas 21, la superficie del ánodo era de 0,15 m<sup>2</sup>, el voltaje de 0 – 80 V, amperaje 0 – 40 A. Han alcanzado una eliminación del 85% de SS, 90% de turbidez, y 75 % de DQO, y un 100% de ortofosfato. Utiliza la tercera parte de coagulantes.</li> </ul>
	<p>Hutnan M., et al</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Han tratado aguas de la digestión anaeróbica de los lodos por electrocoagulación en una planta de 200 h-e, 25 m<sup>3</sup>/d. Con un volumen promedio de agua residual de 25 m<sup>3</sup>/día. El sistema de electrodos estaba formado por electrodos de aluminio y hierro cilíndricos, alternado cada uno de la siguiente forma: Fe<sup>+</sup>- Al<sup>-</sup>-Al<sup>+</sup>-Fe<sup>-</sup>-Al<sup>+</sup>-Al<sup>-</sup>-Fe<sup>+</sup>- Al<sup>-</sup>- Al<sup>+</sup>- Fe<sup>-</sup>. Alternativamente los polos de los electrodos eran alimentados con corriente continua, con un voltaje de 40 V y un rango de intensidad de corriente de 50 – 200 A. Han logrado una eficiencia promedio en la eliminación de la DQO más del 80%, alta eficiencia en la eliminación de fósforo. Mientras que la reducción del nitrógeno disuelto fue mínimo.</li> </ul>
	<p>Chen Guohua et al</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Han tratado agua residual de restaurantes mediante el proceso combinado de electrocoagulación y electroflotación con electrodos de aluminio, y de Ti en el ánodo y acero inoxidable en el cátodo, separación 4 mm. Sostienen que el pH y la conductividad del agua de alimentación no afectaron la eficiencia de remoción de contaminantes. La intensidad de carga, en la electrocoagulación y electroflotación, es la variable de operación más importante para la eficiencia de tratamiento. Han alcanzado una eliminación del 99 % de aceite y grasa, un 88% de DQO, y 98% de SS, con tiempo de retención &lt; 4,5 minutos. El consumo de total de energía fue de 0.5 kWh/( m<sup>3</sup> de agua residual tratada) bajo las condiciones operación estudiadas y que el lodo producido fue bajo y más deshidratado.</li> </ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
	Bahadir K. Körbahti, et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estudiaron el tratamiento electroquímico de las aguas residuales fenólicas, utilizando un reactor tubular continuo, construido de acero inoxidable con un ánodo cilíndrico de carbón en el centro. Han adicionado NaCl en una concentración de 120 g/l, para una concentración inicial de fenol de 450 – 3100 mg/l con una densidad de corriente de 61,4 y 54,7 mA/cm<sup>2</sup> respectivamente. Los resultados que han obtenido muestran que: para una concentración inicial de 450 mg/l de fenoles alimentados se reducen, en función del tiempo de residencia de 10 a 20 minutos, al 56% y 78% respectivamente. A los 40 minutos el 100% del fenol fue removido. Y con 3100 mg/l de fenoles en la alimentación y a tiempos de residencia de 1; 1,5; 2 y 3 horas la remoción del fenol fue de 42%, 71%, 81%, y 98% respectivamente. Concluyen que el proceso, en un reactor tubular, puede ser factible y segura para el tratamiento electroquímico de aguas residuales fenólicas.</li> </ul>
	Chuanping Feng, et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>Han realizados experimentos del proceso electroquímico, a nivel de laboratorio, sobre aguas residuales municipales. En base a éstos resultados, han implementado un sistema de tratamiento electroquímico a escala piloto de 0,3 m<sup>3</sup>/h. Para evaluar el rendimiento del proceso de electrocoagulación han tratado aguas residuales domésticas, aguas de estanques conteniendo algas, aguas residuales de purines. Los rendimientos alcanzados tratando aguas residuales domésticas fueron: en la eliminación de N-total un 73%, del P- total 99%, del NH<sub>4</sub>-N 81% y de la DQO 86%. Y tratando agua de laguna conteniendo algas la eliminación del N- total fue 83%, del P- total 90%, de la DBO 78%, de la DQO 92%, de los SS 97%, y la eliminación de clorofila A de las algas fue del 100%. Tratando aguas residuales de purines de cerdo no han logrado los rendimientos esperados. Sostienen que puede deberse a la alta concentración de sólidos en suspensión y que para este tipo de agua el sistema de tratamiento electroquímico requiere un pretratamiento.</li> </ul>





Objetivo	Autores	Datos de interés
	Bayramoglu M. et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para la separación de partículas y depuración en la industria textil, han utilizado electrodos de Al y Fe. Con pH superior a 6, los rendimientos caen de forma importante.</li> <li>• Con electrodos de Al, con pH ácido, logra reducciones en la turbidez del 98% y del 61-65% en la DQO</li> <li>• Con electrodos de Fe, con pH entre 3 y 7, la turbidez se reducía entre el 75 y el 98%, y la DQO entre el 47 y el 77%</li> <li>• Con pH superior a 10, la turbidez se reducía en un 87% y la DQO en un 26%</li> <li>• Sugieren el empleo de una nueva unidad Faraday/m3 de agua residual</li> <li>• Los consumos de energía son más bajos con electrodos de Fe. La tercera parte que con Al, 0.1 y 0,3 dolares por kg de DQO eliminado. Los costos de consumo de los electrodos suponen el 50% del total para el Fe, y el 80% para el Al</li> <li>• Los costos con Al aumentan al subir el pH</li> <li>• Disminuyen los costos al subir la conductividad, entre 1000 y 4000 micro Siemens/cm</li> <li>• Con electrodos de Al, Tr=10 minutos y densidad de corriente de 150 A/m2, el costo es de 28 F/m3, y con electrodos de Fe, Tr=10 minutos, densidad de corriente de 80 a 100 A/m2, el costo es de 17 F/m3</li> <li>• Si se actúa con 100 A/m2 constante, con Al el tiempo de retención es de 15 minutos, y de 10 minutos en el caso de electrodos de Fe</li> </ul>
	Lai Chen L. et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Con aguas de púlido mecánico, utilizando electrodos de Al y Fe, con separación de 1 cm, pH=7,3, variación entre 2 A y 93 A, tiempo de retención hasta 180 minutos, se han obtenido los siguientes resultados:% de eliminación de Cu en 12–20 minutos para 30 –20 V, respectivamente.</li> <li>• La turbidez baja de 180 NTU a 2 NTU en 20 minutos. Con 10 V se da el mejor rendimiento a los 20 minutos.</li> <li>• La eliminación de DQO, para 10, 20 y 30 V, es de 76,85 y 89%, respectivamente, para una intensidad de corriente de 1,86 a 2,77 A</li> </ul>

Autores	Datos de interés
	<p data-bbox="496 351 730 376">Holter P. et al</p> <ul data-bbox="798 351 1406 595" style="list-style-type: none"><li data-bbox="798 351 1406 465">• En tratamiento de aguas residuales es preciso un enfoque sistemático para entender la electrofloculación y el control de los parámetros que intervienen.</li><li data-bbox="798 488 1406 595">• Las variables a considera son: pH, concentración del contaminante, tamaño y posición de la burbuja y la estabilidad del floculo</li></ul>



Objetivo	Autores	Datos de interés
<p>En relación con el décimo objetivo. “Modelización del proceso”</p>	<p>Den W., et al</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Han investigado sobre la cinética que se desarrollan en un reactor monopolar utilizado para el tratamiento de aguas residuales de tratamiento de superficies de metales. Hicieron pruebas a escala de laboratorio (8 l) y piloto (18 l), usando ánodos de placas de hierro y cátodos de placas de acero inoxidable. Los parámetros de optimización fueron la carga y la densidad de corriente que se llevaron a cabo mediante una serie de estudios a escala de laboratorio, seguido de la determinación experimental de la constante de velocidad de coagulación, para aplicarlo posteriormente a la escala piloto. Usaron la ecuación que mejor se adaptó a la experimentación para determinar la constante cinética real del reactor de electrocoagulación. Encontraron una eficiencia de eliminación de turbidez por encima del 90% con bajas concentraciones de hierro residual, a densidad de corriente mayor a 5,7 A/m<sup>2</sup> y con un tiempo de retención de 60 minutos. Estas condiciones de operación correspondieron a cargas mayores a 9,6 F/m<sup>3</sup>. El modelo fue validado por una serie de experimentos a escala piloto usando diferentes números de ánodos con idénticos espacios entre electrodos, dando como resultando una variación en el volumen del reactor, proporcional al número de canales.</li> <li>• Señalan que no se pueden conseguir conclusiones en ensayos batch, validos para ensayos con flujos continuos</li> <li>• Por debajo de 1,5 A/m<sup>2</sup>, poca eficacia en la eliminación de turbidez. Con pH=2, nose reduce la turbidez. Con pH=6, se reduce la turbidez hasta el 80%. Los mejores resultados se obtienen para: Tr= 60 minutos, la intensidad de la corriente igual o mayor de 5,7 A/m<sup>2</sup>, y valor superior a 9,6 F/m<sup>3</sup></li> </ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
	Khemis M., et al.	<ul style="list-style-type: none"><li data-bbox="758 291 1375 537">• Han propuesto un modelo fenomenológico para el pronosticar la eliminación de la DQO por complejacion de la materia suspendida por Al (III), usando placas de aluminio y diferentes tipos de influentes como suspensiones aceite, emulsión de látex y emulsión inorgánica conteniendo sílice.</li><li data-bbox="758 548 1375 1072">• Los autores sostienen que, los datos experimentales están bien representados por el modelo, a pesar de la dispersión notable con suspensiones concentrada de sílice. Los valores pronosticados fueron perfectamente consistentes con los observados experimentalmente. Finalmente han deducido una ecuación del rendimiento de la reducción de la DQO de manera sencilla, pero los valores de DQO para suspensiones inorgánica fueron poco significativos. Concluyen que la eficiencia de la técnica debe ser discutida mejor en términos de reducción de la turbidez o materia suspendida en vez de la DQO.</li></ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
	Cañizares P., et al	<ul style="list-style-type: none"><li>• Con placas de Al, separación de los electrodos de 20 mm, velocidad de flujo de 6,2 cm<sup>3</sup>/s, temperatura de 20°C, y pH= 6,5, desarrollaron un modelo matemático del proceso de electrocoagulación, con datos experimentales obtenidos durante el tratamiento de suspensiones de caolín. El modelo determina la concentración de las diferentes especies de aluminio en función de la concentración de aluminio y del pH, y luego clasifican las especies reales totales, en algunas especies el modelo está en función de su reactividad con el contaminante contenido en el agua residual. Los procesos reactivos que involucran especies de coagulante y contaminante fueron asumidos para desarrollar los modelos mediante el enfoque de pseudoequilibrio. En el caso de la electrocoagulación de las suspensiones de caolín, asumieron dos procesos, primero: la neutralización de la carga de las partículas de caolín (por la adsorción de cationes o por precipitación de hidróxidos de aluminio cargados con partículas de caolín) y segundo, el engranamiento de las partículas dentro de un precipitado en crecimiento. Han logrado buena reproductibilidad de los datos experimentales (<math>r^2 = 0.92</math>) con un número pequeño de parámetros, la mayoría de ellos tienen un valor constante y ello respalda la robustez del modelo propuesto y valida las suposiciones hechas.</li></ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
	Cañizares P., et al	<ul style="list-style-type: none"><li data-bbox="759 293 1375 539">• Los investigadores han utilizado el modelo matemático descrito en el artículo anterior, lo han aplicado al proceso de electrocoagulación para simular el tratamiento de residuos contaminados con las soluciones de NET (negro de Eriocromo T) y la desintegración de una emulsión de aceite/agua.</li><li data-bbox="759 555 1375 1368">• Las reacciones consideradas describen la interacción entre las diferentes especies de aluminio y el contaminante. El modelo propuesto fue en base al comportamiento experimental del sistema mediante un enfoque de pseudoequilibrio. Para el tratamiento de la solución de NET, el mecanismo principal considerado fue el engranamiento del NET en un precipitado de hidróxido de aluminio en crecimiento y la neutralización de carga de las moléculas de NET. Para la desintegración de emulsiones de aceite/agua, la adhesión de más de una gotita a la vez que una partícula de aluminio precipita explica el proceso global. En ambos casos, los valores de los parámetros del modelo han sido fácilmente relacionados con las condiciones experimentales y han obtenido buena concordancia entre los resultados experimentales y el modelado, con coeficientes de regresión (<math>r^2</math>) global de 0.96 y 0.92 para el tratamiento disoluciones de NET y emulsiones de aceite/agua respectivamente.</li><li data-bbox="759 1384 1375 1585">• Realizaron una comparación de la DQO experimental y modelada para diferentes experimentos y han obtenido un coeficiente de regresión (<math>r^2</math>) de 0,92, consideran que cuyo valor es suficientemente alto para validar el modelo.</li></ul>



Objetivo	Autores	Datos de interés
	Carmona M., et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>Han desarrollado un modelo simple para predecir la eliminación de hidrocarburos fraccionados en aguas residuales usando electrodos de aluminio como ánodo. El modelo fue aplicado exitosamente para la interpretación de datos experimentales obtenidos en el laboratorio. De acuerdo a los datos experimentales obtenidos han encontrado que con la ecuación tipo de Langmuir consiguieron el coeficiente de correlación más alto (<math>r^2=0,973</math>).</li> <li>Sostienen que el modelo fue capaz de describir los efectos de la densidad de corriente y la concentración de contaminantes sobre la eficiencia del tratamiento de aguas residuales. La cantidad de contaminante en la muestra fue determinada por la DQO, COT, turbidez, y potencial Z.</li> </ul>
	Hu C. Y., et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desarrollaron un modelo cinético de orden variable derivada de la ecuación de Langmuir para simular la cinética de la defluorización de aguas por electrocoagulación usando electrodos de aluminio. Los resultados han mostrado buena concordancia entre la ecuación pronosticada y los datos experimentales, obteniendo un coeficiente de correlación de 0,995. Han encontrado que la eficiencia de la corriente es independiente de la concentración inicial del fluoruro pero varía con la densidad de corriente y es necesario obtenerlo experimentalmente.</li> <li>Han observado que el modelo no puede simular exitosamente la defluorización por electrocoagulación si el cambio del pH es demasiado violento ya que aparece el punto de equivalencia en la trayectoria de la curva.</li> </ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
	Zaroual Z., et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Con el fin de controlar los factores que influyen en el mecanismo de eliminación del cromo como la precipitación, la adsorción y sus efectos sobre la electrocoagulación del Cr (III), han establecido un diseño estadístico utilizando los resultados experimentales como es la "Metodología de superficies de respuesta (RSM)". El RSM lo han utilizado para desarrollar, mejorar y optimizar el proceso de electrocoagulación, relacionando la eficacia de eliminación de cromo, el consumo de energía y las cuatro variables cuantitativas, es decir, el pH, el potencial de electrólisis, los tiempos de electrólisis, la temperatura y el aluminio remanente en la solución.</li> <li>• La representación gráfica de las variables con este modelo en el espacio les permitió definir las condiciones óptimas de los parámetros como son: el valor óptimo de pH fue 4,23; el potencial 9,14 V, el tiempo 10 min y la temperatura 27,5 °C. A estas condiciones han observado una eficiencia del 91% de la eliminación de cromo, con un consumo de energía de 3,536 kWh/m<sup>3</sup>.</li> </ul>
	Ölmez T.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilizó la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) para estudiar los efectos de las diferentes condiciones de funcionamiento en la eliminación de cromo hexavalente (Cr (VI)) por electrocoagulación con electrodos de acero inoxidable. Observó que las condiciones óptimas para la completa eliminación del Cr (100%) fueron: corriente eléctrica aplicada de 7.4 A, concentración del electrolito (NaCl) 33,6 mM y 70 minutos de tiempo de aplicación. El investigador concluye que el modelo utilizado para predecir la eficiencia de eliminación del Cr (VI) considera que es adecuadamente aplicable.</li> </ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
En relación con el décimo primer objetivo. “Diseño de plantas optimizadas experimentales de electrocoagulación”	Sanchez C. L., et al	<ul style="list-style-type: none"><li>• A partir de las experiencias a nivel laboratorio y piloto, los investigadores han diseñado una unidad industrial, para tratar una mezcla de aceites solubles con una DQO de 230.000 mg/l y SS de 12.000 mg/l, procedentes de una fábrica. El caudal tratado fue de 5000 m<sup>3</sup>/año. La eficiencia que han alcanzado fue de 94% para la DQO, el influente lo ajustaban pH a 7 y la conductividad cuando era necesario a 5 mΩ-1cm-1.</li><li>• Realizaron un estudio económico: El costo total de inversión fue de 374.336 euros, el costo total de equipamiento fue de 66 190 euros. El costo total de tratamiento fue calculado en 116,52 €/m<sup>3</sup> considerando una vida útil de los elementos de 10 años, excepto para el tanque de sedimentación que se consideró para 5 años y para el filtro prensa se consideró 17 años.</li></ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
	Escobar C., et al	<ul style="list-style-type: none"><li data-bbox="759 293 1375 1016">• Han realizado un enfoque para la aplicación del proceso de electrocoagulación a nivel industrial, estableciendo una relación predecible entre la densidad de corriente y el consumo de energía específica, y han encontrado una relación lineal a pH = 7, que dio como resultado una ecuación del consumo de energía específica (kWh/m<sup>3</sup>) = <math>0,049 \times j - 1,05</math>, donde j es la densidad de corriente en A/m<sup>2</sup>. Observaron que el cobre y el plomo eran eliminados casi al 100% a pH 7, mientras que el cadmio dependía de la densidad de corriente y de la velocidad del flujo, por ello realizaron estudios teóricos de la cinética del cadmio encontrando una relación lineal de la concentración a través del tiempo con un <math>r = 0,9936</math>, indicando una reacción cinética de primer orden con una tasa constante de 1,053 min<sup>-1</sup>, para una densidad de corriente de 31 A/m<sup>2</sup> con una mayor eficiencia de eliminación del cadmio.</li><li data-bbox="759 1039 1375 1458">• Usando estos resultados y la eficiencia de eliminación del cadmio de 99,8% en una ecuación de flujo pistón, han determinado el tiempo de residencia que fue de 5,9 minutos, para un caudal de 100 m<sup>3</sup>/h, siendo el volumen del reactor a escala industrial de 9,83 m<sup>3</sup>. La densidad de corriente utilizada fue de 31 A/m<sup>2</sup>, donde el consumo específico fue de 0,47 kWh/m<sup>3</sup>. Los investigadores sostienen que son necesarios estudios adicionales para verificar sus resultados y seguir perfeccionando los parámetros a escala industrial.</li></ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
En relación con el décimo segundo objetivo. “Estudio energético del proceso”	Hasson D., et al	<ul style="list-style-type: none"><li>• Estudiaron la energía necesaria y el área específica del electrodo para la eliminación electrolítica de <math>\text{CaCO}_3</math>. Realizaron varios experimentos con un rango de corriente de 0,08 a 2,5 A, voltaje desde 2,5 a 8,4 V, caudal de alimentación de 2,3 l/min y número de Reynolds igual a 700. Han encontrado que la eliminación del <math>\text{Ca}^{2+}</math> en relación con el tiempo fue lineal, aumentaba la eficiencia de eliminación al incrementarse la intensidad de corriente de 0,08 a 2,5 A.</li><li>• Obtuvieron importante información de diseño al relacionar la densidad de corriente (<math>\text{A/m}^2</math>) tanto con el área específica catódica (<math>\text{m}^2/\text{kg CaCO}_3/\text{h}</math>) como con el consumo de energía específica (<math>\text{kWh/kg CaCO}_3</math> precipitado). Como lo habían previsto, notaron que al incrementar la densidad de corriente aumentaba la energía necesaria pero disminuía el tamaño del equipo.</li></ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
	Chou W.-L., et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluaron el consumo de energía eléctrica en el tratamiento de aguas residuales por electrocoagulación para comprobar si la técnica es económicamente viable para la eliminación de la DQO. El consumo específico de energía lo han calculado en función de 1 kg de DQO eliminado del agua residual durante la electrocoagulación en kWh/kg a voltaje constante. Observaron que cuando aumentaban el voltaje de 10 a 20 V, la eficiencia de eliminación de la DQO era apreciable de 62,3 % a 77,3 % con un consumo de energía ligeramente incrementado. Mientras que al incrementar el voltaje de 20 a 30 V, la eficiencia de eliminación de la DQO se incrementó ligeramente de 77,3 a 82,5%, con consumo de energía incrementado significativamente. Considerando ambos, consumo de energía y eficiencia de eliminación de la DQO, el voltaje aplicado de 20 V proporcionó un balance óptimo para el proceso de electrocoagulación, con una razonable eficiencia de eliminación de la DQO con un consumo de energía relativamente bajo.</li> <li>• Por otro lado, observaron que al aumentar la concentración del electrolito de 100 a 200 mg/l de NaCl la eficiencia de eliminación de la DQO se incrementó de 78% a 86%, con un consumo de energía incrementado ligeramente de <math>1,29 \times 10^{-3}</math> kWh/kg a <math>1,84 \times 10^{-3}</math> kWh/kg. Así mismo cuando la concentración del electrolito se incrementó de 200 a 300 mg/l, la eficiencia de eliminación de la DQO se incrementó ligeramente de 86 a 92% con un consumo de energía incrementado de <math>1,84 \times 10^{-3}</math> kWh/kg a <math>2,98 \times 10^{-3}</math> kWh/kg. Considerando ambos parámetros el consumo de energía y la eficiencia de eliminación de la DQO, la concentración óptima de 200 mg/l de NaCl proporcionó un balance óptimo con una eficiencia de eliminación de la DQO deseable y un consumo de energía relativamente bajo.</li> </ul>

Objetivo	Autores	Datos de interés
	Bayramoglu M., et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>Han realizado cálculos de costes que muestran que, en el caso de trabajar con electrodos de hierro, el costo de operación fue aproximadamente de 0,1 \$ US/kg DQO eliminado, y con aluminio fue de 0,3 \$ US/kg DQO eliminado. El costo del consumo de electrodos para el hierro fue cercano al 50% del coste total, y para el aluminio fue del 80% del coste total. Sostienen que para hacer una comparación más precisa, hay que realizar un análisis detallado técnico y económico de todo el proceso. Y que el enfoque realizado en esta investigación sólo son datos preliminares para un estudio detallado.</li> </ul>
	Zongo I., et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>En relación al consumo de energía, de acuerdo a la investigación realizada para la eliminación de la DQO por electrocoagulación, usando electrodos de hierro y aluminio, han encontrado que el gasto de energía para el tratamiento de 1000 ppm de DQO fue estimado en 1,75 kWh/m<sup>3</sup> usando electrodos de hierro y 1,53 kWh/m<sup>3</sup> para electrodos de aluminio. Sostienen que estos valores pueden reducirse en un 30% por el incremento de la conductividad, adicionando 1 g/l de NaCl llegando a ser un costo moderado y un impacto al medioambiente aceptado.</li> </ul>
	Arslan-Alaton I., et al	<ul style="list-style-type: none"> <li>Han determinado el consumo de energía eléctrica en términos de kWh/m<sup>3</sup> de efluente tratado. El consumo de energía a condiciones óptimas de pH 3 fue de 22 mA/cm<sup>2</sup> usando electrodos de aluminio fue de 1,8 kWh/m<sup>3</sup> y con electrodos de acero inoxidable a condiciones óptimas de pH 5 y de 22 mA/cm<sup>2</sup> fue de 3,6 kWh/m<sup>3</sup>, después de 20 – 25 minutos de electrocoagulación. La cantidad de lodo obtenido con electrodos de acero inoxidable fue mucho menor que con electrodos de aluminio.</li> </ul>

## 4.4. Frontera del conocimiento

Basado en los resúmenes de la investigación bibliográfica, se analiza el nivel de respuesta que dicha investigación bibliográfica ofrece a los objetivos iniciales, señalando de una forma clara una frontera del conocimiento actual, que permita definir la novedad de la investigación seguida en esta tesis.

De éste nivel de respuesta, marcaremos, como objetivos a seguir investigando, aquellos que se encuentren en las situaciones siguientes:

- Objetivos que, después de la investigación bibliográfica, siguen sin respuesta.
- Objetivos, que habiendo encontrado respuestas, éstas son contradictorias.
- Objetivos, que habiendo encontrado respuestas, éstas no están suficientemente justificadas en su parte científica o técnica.

Con los objetivos integrados en los grupos anteriores, definiremos los posibles objetivos definitivos, que quedan garantizados en su novedad para justificar una tesis doctoral. De entre estos se identificarán los objetivos definitivos.

### 4.4.1. Nivel de respuesta extraída de la investigación bibliográfica

Se analizan las respuestas a los objetivos iniciales marcados:

#### 1. Conocimiento fisicoquímico de la electrocoagulación

En relación con las respuestas aportadas por los investigadores sobre este objetivo, cabe señalar que se han estudiado los mecanismos de reacción que ocurren en la electrocoagulación donde interactúan tres ciencias fundamentales como son la electroquímica, y los procesos de coagulación y flotación. Existe concordancia entre los trabajos de investigación analizados, en los que se cuantifica la importancia de cada parámetro que interviene en el proceso de electrocoagulación: pH, conductividad, distancia entre electros, tipo de material de electrodo, tipo de



corriente, intensidad de corriente, voltaje, densidad de corriente, diseño de los electrodos, etc.

Debe señalarse que las investigaciones analizadas se refieren a muy diversas aplicaciones, en los que los parámetros son muy variables. Se adoptan distintos tipos de ánodos y cátodos, siendo los de aluminio, hierro y acero inoxidable, los más utilizados. Salvo pequeñas excepciones las investigaciones han sido realizadas en plantas de pequeño tamaño, a nivel laboratorio, y en sistema batch, cuyos resultados no pueden ser aplicados a un proceso de flujo en continuo. Los trabajos analizados no han sido suficientemente sistematizados. Existen lagunas en algunos parámetros correspondientes a la reutilización de las aguas.

2. Influencia de los parámetros físicos y químicos (pH, conductividad) sobre la electrocoagulación.

Los estudios realizados por los investigadores consultados concuerdan que el pH tiene influencia sobre la eficiencia del proceso de electrocoagulación en la eliminación de contaminantes. Sostienen que al trabajar con electrodos de aluminio el rango de pH que se obtienen mejores resultados está entre 4 – 7, mientras que con electrodos de hierro el rango de trabajo está entre 3 – 9. Pero todo depende de la función asignada al proceso de electrocoagulación, electroflotación, electrofóresis o electrolisis. Es variable de igual forma en función del contaminante a eliminar.

En relación con la conductividad, algunos autores han encontrado que la conductividad no tiene influencia en la eliminación de la DQO en el rango investigado por ellos, mientras que otros contaminantes como los SS, aceites y grasas si se han eliminado en gran porcentaje. Otros autores sostienen que mejora ligeramente la eficiencia, pero depende del tipo de contaminante, ya que en algunos casos, al aumentar la concentración del electrolito, se perjudica la eliminación del contaminante por ejemplo la turbidez. Donde sí influye la conductividad es en el costo de operación, han observado que al aumentar la conductividad dichos costes disminuyen.

3. Eficacia de la electrocoagulación sobre la eliminación de la turbidez.

Del análisis general de la bibliografía se puede decir que la eliminación de la turbidez, estuvo por encima del 90%, en muchos de los casos examinados, pero los resultados dependieron del pH, del tiempo de floculación-sedimentación, tiempo de electrólisis, intensidad de corriente y la presencia de los sólidos en suspensión.

4. Eficacia de la electrocoagulación sobre la eliminación de la DQO y absorción UV.

De la revisión bibliográfica se observa que la eliminación de la DQO dependió del origen del líquido residuo sometido al tratamiento por electrocoagulación, ya que se encontró una eficiencia de eliminación que iba desde 40% hasta el 98%, ya sea utilizando electrodos de hierro, aluminio o acero inoxidable, las altas eficiencias también dependían del pH, densidad de corriente, y largos tiempo de electrocoagulación.

En cuanto a la medición de la absorción UV, solo un estudio ha reportado valores a 436 nm trabajando con aguas coloreadas de la industria textil, han observado que al aumentar el metal disuelto (Al o Fe) en la solución la absorbancia tendía a cero, y que la DQO remanente correspondía a materias no visibles presentes en la solución.

Se han reportado datos sobre la medición del color que, en algunos casos y dependiendo del tipo de residuo, han alcanzado altos rendimientos de hasta un 99% de eliminación del color.

Un estudio reportó la eliminación de la absorción UV a 254 nm de agua prepotable en un 14%, y del color 20% trabajando con electrodos de aluminio a pH 6,5.

5. Eficacia de la electrocoagulación sobre la reducción aniones (nitratos y fosfatos)

De las investigaciones analizadas podemos decir que se han investigado poco en relación a la eliminación de aniones como es el caso de nitratos y fosfatos. De lo analizado se ha podido extraer que se han obtenido reducciones de nitratos entre un

70 – 97%, trabajando con electrodos de aluminio, hierro, titanio o Ti/Pd-Co. Mientras que con electrodos de grafito la eliminación fue muy pobre.

En relación con la eliminación de sulfatos, se alcanzan mejores rendimientos con electrodos de hierro y a pH ácido alcanzando un 75%.

Se ha podido comprobar que la electrocoagulación elimina totalmente los fosfatos, aunque han sido muy pocos investigadores los que dan resultados acerca de este anión.

#### 6. Eficacia de la electrocoagulación sobre la eliminación de cationes

En la investigación bibliográfica se ha encontrado varios estudios sobre la eliminación del arsénico del agua, dando comparaciones con electrodos de aluminio, hierro y titanio, y sostienen que con el Fe se alcanzan mejores resultados. Pero todos concuerdan que primero hay que oxidar el  $As^{3+}$  a  $As^{5+}$ , inyectando aire, ya sea antes del electrocoagulador o dentro, de ésta manera han logrado alcanzar hasta un 98% de eliminación del arsénico.

En relación al cromo sostienen que, con electrodos de aluminio se elimina más rápido a altas densidades de corriente y largos tiempos de electrocoagulación. Mientras que con electrodos de hierro se han obtenidos mejores resultados a bajas corrientes y bajas concentraciones de cromo, llegando a eliminar cerca de 100% de cromo.

Con electrodos de Fe se obtienen buenos resultados. Si la concentración de cromo es elevada (50mg/l), se necesitan altas corrientes (1 – 3 A) para conseguir buenos resultados de eliminación. Otros trabajos reportan que se logra eliminar el cromo si después de la electrocoagulación el clarificado se añade carbón activo granular.

Referente a los iones de Ni, Cu y Zn, señalan que han alcanzado rendimientos superiores al 98% de estos iones, trabajando con electrodos de aluminio. Otras investigaciones indican que la eliminación del Pb, Cu, y Cd, trabajando con electrodos de hierro y a pH 7, se han eliminado en más del 99%.

## 7. Efectos de la electrocoagulación sobre las aguas prepotables

En relación a la eliminación de E. Coli de las investigaciones realizadas se han alcanzado buena eliminación de los E. Coli a pH 2 ó a pH 9 trabajando con electrodos de acero corriente con tiempos de retención de 20 minutos a 1 A, medidos en absorbancia, pero los mismos resultados han alcanzado con electrodos de aluminio, sin variar el Ph, y con 30 minutos de tiempo de retención. Otros autores sostienen que han alcanzado una eliminación de cuatro décadas logarítmicas de E. Coli y bacteriófagos MS2 en aguas que contenían cloruros. Otro autor sostiene que trabajando con electrodos de placas de titanio revestido con platino y placas conductoras de hierro a 170 V y campo eléctrico de 8,5 V/cm<sup>2</sup> han logrado reducir desde 2,6 x 10<sup>5</sup> NMP/100 ml de bacilos coliformes a menos de 2 NMP/100 ml.

También se dan datos sobre la eliminación del ácido fúlvico usando electrodos de fibra de carbono fijada a una pieza de hierro a 20V y 1 hora de tratamiento, cuyo rendimiento llegó al 100%. Otro estudio muestra la eliminación de bromo y THMs trabajando con electrodos de carbono y titanio, aseguran que la electrocoagulación es efectiva para tratar los subproductos de desinfección. En relación a la reducción del fluoruro de agua tratada se han reportado una eliminación de más del 85% de éste compuesto, por lo que se dice que la electrocoagulación es una técnica que se puede utilizar para defluorización del agua.

## 8. Efectos de la electrocoagulación sobre las aguas residuales depuradas

Los estudios analizados reportan el tratamiento de las aguas residuales de diferentes procedencias.

Usando el proceso DAF con electrodos de aluminio y con un voltaje de hasta 80 V y 40 A, han eliminado un 85% de SS, 90% de turbidez, 75% de DQO, 100% de ortofosfato. Otro estudio usando electrodos cilíndricos concéntricos de Fe-Al a 40 V y a 50 – 200 A, han eliminado un 80% de DQO, alta eliminación de fósforo y baja eliminación de nitrógeno. También se encontró el tratamiento del agua residual de restaurante se han eliminado 99% de aceites y grasas, 88% de DQO, 98% de SS con tiempo de

tratamiento de 4,5 minutos. Otros estudios muestran la eliminación del fenol a una concentración de 3100 mg/l en 1 hora de tratamiento del 42% y de un 98% con 3 horas de tratamiento, sin embargo trabajando a una concentración de 450 mg/l a los 40 minutos se eliminó el 100% de fenol. Otros investigadores han experimentado el tratamiento de aguas residuales eliminando el 73% de N-total, 99% de P-total, 81% de  $\text{NH}_4\text{-N}$ , 86% de DQO y aguas que contenían algas eliminando el 82% de N-total, 90% de P-total, 92% de DQO, 97% de SS, y 100% de clorofila A.

#### 9. Rendimiento de diferentes tipos de electrodos, planos y tubulares

Se ha analizado un estudio que experimentó en una celda donde los electrodos en el cátodo eran placas verticales de aluminio y el ánodo eran cilindros horizontales, observaron que han alcanzado altas eficiencias en comparación cuando se orientaban los ánodos en forma vertical, sostienen que puede deberse a la mejor mezcla del  $\text{Al}^{3+}$  disuelto anódicamente con la solución a tratar. Otros autores han experimentado con electrodos tipo barra de aluminio y acero inoxidable, trabajando con acero inoxidable encontraron optimizar el proceso a pH inicial de 5, con reducción del color y de la DQO alta y rápida durante los primeros 25 minutos. Cuando han trabajado con aluminio el óptimo fue a pH 3 alcanzando una eliminación del color y DQO en un 80 y 90% respectivamente, después de 5 minutos de tratamiento, para ambos tratamientos la densidad óptima fue de 22 mA/cm<sup>2</sup>.

Otro estudio se realizó en una unidad de 10 cilindros concéntricos, alternando electrodos de hierro y aluminio, y alcanzaron una eliminación de la DQO en más del 80%. Otra investigación se llevó a cabo en un reactor tubular con un ánodo cilíndrico de carbono en el centro para eliminar fenol y han logrado buena eficiencia para bajas concentraciones de fenol y 40 minutos de tratamiento. Para alcanzar las mismas eficiencias a altas concentraciones se requieren 3 horas de tratamiento.

#### 10. Modelización del proceso

Las investigaciones analizadas sobre este objetivo nos muestran las siguientes resultados: Unos autores han realizado un modelo del proceso de electrocoagulación

usando como parámetro de optimización la carga y la densidad de corriente, primero a escala laboratorio y luego el modelo fue validado por una serie de experimentos a nivel de planta piloto, en función de la eficiencia de eliminación de la turbidez que fue más del 90%.

Otro modelo estudiado fue realizado para pronosticar la eliminación de la DQO, usando electrodos de Al. Han encontrado buena concordancia entre los valores teóricos y experimentales, pero sostienen que la eliminación de suspensiones inorgánicas fueron poco significativas, siendo mejor usar los términos de turbidez ó SS.

Otros autores han realizado un modelo para determinar la concentración de diferentes tipos de aluminio y distintos pH. Para el modelo asumieron las tipos que está en función de su reactividad con el contaminante, logrando buena reproductibilidad de los datos experimentales, respaldando así el modelo propuesto. Igualmente realizaron una comparación de la DQO modelada y experimental para diferentes ensayos.

Otro estudio desarrolla un modelo para la eliminación de hidrocarburos con electrodos de aluminio obteniendo buenos resultados a nivel laboratorio. Otro modelo ha sido desarrollado para la defluorización del agua, usando electrodos de aluminio, los resultados han mostrado buena concordancia entre los valores pronosticados y los experimentales, pero han observado que el pH tiene gran influencia en este proceso.

Otros autores han utilizado la Metodología de Superficies de Respuesta (MSR) para optimizar el proceso de electrocoagulación en la eliminación del cromo (III) y cromo (VI), han alcanzado una eficiencia de eliminación del 91% para el cromo (III) y un 100% de eliminación para el cromo (VI).

### 11. Diseños de plantas optimizadas experimentales de electrocoagulación

En relación a este objetivo se ha podido extraer los siguientes resultados: Unos investigadores a partir de experiencias a nivel laboratorio y piloto han diseñado una unidad industrial para tratar mezclas de aceites, el caudal tratado fue de 5000 m<sup>3</sup>/año y la eficiencia en términos de DQO fue del 94%. Otro estudio se basó en el dimensionamiento de una planta a escala industrial de 9,83 m<sup>3</sup>, con un caudal de tratamiento de 100 m<sup>3</sup>/h, tiempo de residencia de 5,9 minutos, el rendimiento de eliminación del cadmio de 99,8%.

### 12. Estudio energético

Un estudio reportó el consumo de energía en el tratamiento de agua prepotable que fue de 20 kWh/kg Al, para una densidad de corriente de 10 a 20 A/m<sup>2</sup>. En otra investigación el consumo de energía fue de 0,5 kWh/m<sup>3</sup> de agua residual tratada. Otro estudio el consumo de energía fue de 3,53 kWh/m<sup>3</sup> de agua tratada. Otros valores reportados sobre el consumo de energía fueron de 0,47 kWh/m<sup>3</sup> de agua residual industrial tratada. Otros autores han estudiado el consumo de energía en función de la DQO eliminada a voltaje constante de 20 V y adicionando 200 mg/l de NaCl, para lograr un 86% de eliminación de la DQO con un consumo de energía de  $1,84 \times 10^{-3}$  kWh/kg de DQO. Otra investigación se basó en el cálculo de costes, el coste de operación usando electrodos de hierro fue de 0,1 \$ US/ kg de DQO eliminada, y con aluminio fue de 0,3 \$ US/kg de DQO eliminada, sostienen que son datos preliminares y hay que hacer estudios más detallados de todo el proceso. Otros autores muestran datos sobre el consumo de energía para el tratamiento de 1000 ppm de DQO usando electrodos de hierro y aluminio, el gasto de energía para el hierro fue de 1,75 kWh/m<sup>3</sup> y de 1,53 kWh/m<sup>3</sup> para electrodos de aluminio. Otro estudio muestra el consumo de energía en función del efluente tratado, usando electrodos de acero inoxidable el consumo de energía fue de 3,6 kWh/m<sup>3</sup> a pH 5 y con electrodos de aluminio fue de 1,8 kWh/m<sup>3</sup> a pH 3 y a densidad de corriente constante 22 mA/cm<sup>2</sup> y tiempo de electrocoagulación de 20 – 25 minutos.

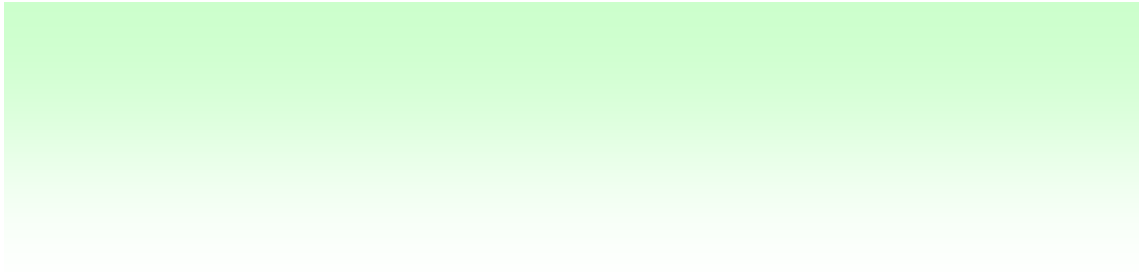
## 4.4.2. Tabla resumen

Objetivo Inicial	Nivel de respuesta	Observaciones
1	Completo	Existe concordancia entre numerosos trabajos de investigación en los que se cuantifican los efectos de los parámetros (pH, conductividad, distancia entre electros, tipo de material de electrodo, etc.) sobre la electrocoagulación.
2	incompleto	En relación a la influencia del pH muchos autores coinciden en que el pH tiene gran influencia en la electrocoagulación. Mientras que, en relación con la conductividad la respuesta es poco satisfactoria y se basan sobre todo en la influencia de los costes.
3	Incompleto	En todos los casos investigados sobre la turbidez han obtenido altos rendimientos, pero con elevados tiempos de electrocoagulación.
4	Incompleto	En relación a la DQO, las respuestas son muy variadas, dependiendo de los parámetros que intervienen. En cuanto a la absorción UV hay muy pocos reportes.
5	Incompleto	Se ha investigado muy poco sobre la eliminación de los nitratos que no satisfacen la respuesta. Mientras que las investigaciones realizadas sobre la eliminación de fosfatos hay concordancia de que se eliminan casi por completo.
6	Incompleto	De las investigaciones realizadas en relación a los cationes de As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, y Zn, se puede decir que los investigadores alcanzaron altos rendimientos de eliminación de estos elementos, pero las respuestas no son satisfactorias porque quedan aún lagunas sobre los tiempos de retención y dimensiones de la celda, muchos se han realizado en vasos de precipitado como electrocoagulador.
7	Incompleto	En relación a estudios sobre aguas prepotables, se han dado datos sobre la eliminación de E. Coli, pero en diferentes unidades como son absorbancia y logarítmicas. Solo un estudio muestra en unidades que sugieren las normas, utilizando altas corrientes. Muchos autores concuerdan que la electrocoagulación puede ser útil para tratar los productos de desinfección o tratamiento del agua potable.
8	Incompleto	Se ha podido observar que con este tipo de agua se ha investigado muy poco y los datos obtenidos no satisfacen el objetivo propuesto.
9	Incompleto	La mayoría de las investigaciones analizadas fueron hechas usando electrodos tipo placa y muy poco han sido en celdas tubulares, por lo que se ha podido observar para lograr altos rendimientos se requieren altas densidades de corriente y largos periodos de tratamiento. Las investigaciones realizadas a este respecto fueron independientes y no han sido comparables
10	Incompleto	Sobre la modelización del proceso, se han utilizado modelos matemáticos, cinéticos, ecuaciones de adsorción y diseños estadísticos sobre algunas aplicaciones específicas. Todos ellos con buenos resultados y han sido validados experimentalmente.
11	completo	Se han encontrado datos consistentes en la optimización de plantas de electrocoagulación para tratar aguas residuales industriales.
12	Incompleto	Se han reportado el consumo de energía en kWh/m <sup>3</sup> de agua tratada, en otros casos se han dado en kWh/kg de DQO eliminado. Pero los valores de energía consumida dependían del rendimiento que se alcanzó en cada caso.

Tabla 4.2. Tabla resumen de frontera de conocimiento



## **CAP. 5. OBJETIVOS DEFINITIVOS**





## **5. OBJETIVOS DEFINITIVOS**

Los objetivos seleccionados en principio se concretaron en:

1. Profundizar en el conocimiento de la tecnología de electrocoagulación, estudiando la influencia de las siguientes variables en el proceso:
  - Intensidad eléctrica.
  - Caudal del agua tratada.
  - Variación del pH.
  - Temperatura.
  - Materiales de las placas de electrodo y conductoras.
  - Combinación de las placas de electrodos y conductoras.
  
2. Verificar el grado de cumplimiento de los sistemas de electrocoagulación respecto a las normativas actuales de reutilización.
  - Reducción de parámetros físico-químicos de las aguas (SS, turbidez, nitrógeno y fósforo).
  - Reducción de la contaminación biológica de las aguas (E. coli y coliformes totales).
  
3. Verificar el rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación, en relación con la modificación de la dureza del agua.
  
4. Verificar el rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación, en relación con la modificación de la conductividad de las aguas efluentes del secundario. Para alcanzar estos objetivos se realizó una primera fase experimental en Laboratorio, (FASE 1ª). Con los resultados de dicha primera fase, se preparó una memoria de proyecto de diseño de un prototipo de planta de electrocoagulación y electroflotación para el tratamiento avanzado de las aguas residuales con fines de reutilización.

El proyecto de investigación, *“Diseño de un prototipo de planta de electrocoagulación y electroflotación para el tratamiento avanzado de las aguas residuales con fines de reutilización”*, se presentó en la convocatoria del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2004-2007 de la Orden MAM/321/2007, del 1 de febrero, y resolución del 22 de febrero de 2007. **Proyectos de I+D+i (convocatoria 2007)- Ministerio de Medio Ambiente.** La Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad del Ministerio de Medio Ambiente, resolvió conceder a la Universidad Politécnica de Madrid como solicitante del proyecto, la subvención solicitada.

El diseño de la planta piloto, se constituyó en la segunda fase de investigación de esta tesis, (FASE2<sup>a</sup>). El nuevo objetivo incorporado fue:

5. Diseño y construcción de una planta piloto a nivel semiindustrial.

Continuando con una tercera fase de la tesis, realizando trabajos de experimentación e investigación con el prototipo de planta construida; (FASE3<sup>a</sup>). Incluyéndose los siguientes objetivos complementarios:

6. Estudio energético del proceso de electrocoagulación.

## **CAP. 6. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN**





## 6. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### 6.1. Metodología analítica seguida

#### Metodología para el análisis para los parámetros fisicoquímicos.

Los análisis se llevaron a cabo siguiendo la metodología analítica del “Standard Methods for the Examination of water and Wastewater”, APHA – AWWA- WPCF.

- **Demanda química de oxígeno (DQO)**. La muestra de agua se oxida con una solución sulfúrica caliente de dicromato potásico y sulfato de plata como catalizador. Los cloruros son enmascarados con sulfato de mercurio. A continuación se determina fotométricamente la concentración de los iones  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  amarillos no consumidos.
- **Oxígeno disuelto**, se midió por el procedimiento de luminiscencia para oxígeno disuelto en soluciones acuosas. Utilizando un sensor LANGE LDO™/sc 100.
- **Fósforo total**, En solución sulfúrica los iones de ortofosfato forman con los iones molibdato ácido molibdenofosfórico, y éste último con ácido ascórbico se reduce al azul de fosfomolibdeno que se determina fotométricamente.
- **Sulfatos**, los iones sulfato forman con los iones de bario sulfato bórico difícilmente soluble. La turbidez que así se produce se mide en el fotómetro.
- **Sólidos en suspensión**. Los sólidos en suspensión se determinan por filtración a través de una membrana de 0,45  $\mu\text{m}$ , y posterior medición gravimetría del residuo después de secarlo a 103 – 105 °C durante 60 minutos.
- **Alcalinidad**, se determinó mediante titulación, de acuerdo con el Standard Methods.
- **Dureza**, se determinó mediante titulación con EDTA, de acuerdo con el Standard Methods.

- **Turbidez.** Se determina por nefelometría midiendo la relación entre la luz incidente sobre la muestra y la dispersada a un ángulo de 90° con respecto a ésta.
- **pH.** Se basa en medir el potencial eléctrico creado en la membrana de un electrodo de vidrio, el cual es función de la actividad de los iones hidrógeno a ambos lados de la membrana.
- **Conductividad.** La determinación de la conductividad se realiza mediante un equipo llamado conductímetro, que tiene una fuente de corriente alterna, un puente de Wheatstone y una célula de conductividad. Además el equipo suele disponer de una sonda de temperatura que permite la compensación automática.
- **Microbiología.** Para la determinación microbiológica se han utilizado medios de selectivos Chromocult® Coliform Agar, de Merck, para la detección de coliformes totales y E. coli.

Las colonias se han contado utilizando un contador Darfield Colony Counter QUEBEC®.

- **Nitrógeno de nitratos,** en solución sulfúrica y fosfórica los iones de nitrato forman con 2,6-dimetilfenol (DMP) el compuesto 4-nitro-2,6-dimetilfenol que se determina fotométricamente.
- **Metales.** Los metales se determinan por espectrometría de absorción atómica es el siguiente. La muestra líquida, previo tratamiento en caso necesario, es aspirada, vaporizada y atomizada por llama o por vía electrotérmica. Al mismo tiempo la fuente luminosa emite un haz de luz a la longitud de onda de máxima absorción del metal que se analiza. El metal atomizado en la llama absorbe parte de la radiación incidente, que es medida en un detector fotoeléctrico. La cantidad de energía absorbida en la llama a una longitud de onda característica, es proporcional a la concentración del elemento en la muestra, en un intervalo de concentraciones limitado (Ley de Beer).
- **Aluminio (Al),** el procedimiento utilizado es análogo a US Standard Methods 3500-Al D e ISO 10566 E30. Se han usado reactivos de test Aluminio Spectroquant®. En solución débilmente ácida amortiguada con acetato los iones aluminio forman con cromazurol S un compuesto



violeta azulado que se determina fotométricamente, usando un fotómetro Spectroquat® NOVA 60 de Merck.

## **6.2. Metodología de trabajo, fase 1ª**

Se realizaron las siguientes actividades:

- Reunión de planificación y coordinación, en la que se acordó realizar primero un estudio a nivel de laboratorio, como objetivo realizar los ensayos choque, consistentes en ver el rango de las diferentes variables que influye en el proceso como son: voltajes, intensidades de corrientes, parámetros de control, etc.
- Adquisición de materiales necesarios para la investigación. Se procedió a adquirir todo el material necesario para la construcción de celdas de vidrio, placas de hierro y aluminio, y fuente de alimentación regulable de 0 – 200 V. Así como los reactivos necesarios para el análisis de los parámetros a controlar en las aguas tratadas (DQO, Ntotal, Ptotal, y medios de cultivo para análisis microbiológico, etc.).

## **6.3. Diseño y montaje de un reactor a escala de laboratorio, Fase 1ª**

Para la puesta en contacto con el tema, antes de iniciar la investigación, se construyó un reactor de vidrio, de dimensiones internas útiles de 35×89×3 cm para la electrocoagulación de las aguas en el que se instalaron dos placas metálicas de aluminio de 54×38,4 cm.

Para las medidas de la evolución del proceso de electrocoagulación se utilizaron los siguientes medidores:

- Fuente de alimentación 0 - 58 VCC, 0 - 9 ACC, 570 W, marca Grelco.
- Multímetro digital de precisión Brymen, modelo BM817.
- pHmetro Crisol modelo 507.

- Conductímetro Crisol modelo 524.
- Bomba de 900 l/h.

Todos los equipos quedan descritos de forma completa en el Anejo 3 Especificaciones técnicas y Planos de la planta.

En la foto adjunta se muestra el equipo inicial de experimentación sobre la de electrocoagulación para ensayos con de aguas sintéticas, de ríos y residuales.

Desde el comienzo de la fase experimental de la tesis, (Marzo del 2006), hasta el (25/IV/08) empecé la puesta en contacto con la tecnología de la electrocoagulación, poniéndome en contacto con estos tipos de instalaciones. Instalé en consecuencia un dispositivo experimental, que aparece en la foto siguiente.



*Figura 6.1. Dispositivo experimental de electrocoagulación de aguas*

## 6.4. Diseño y montaje de un reactor a escala de laboratorio, Fase 2ª

En una primera etapa de la investigación, se construyeron 5 celdas de vidrio, con electrodos de placas de aluminio en cuatro de ellas, y 1 celda con electrodos de hierro.

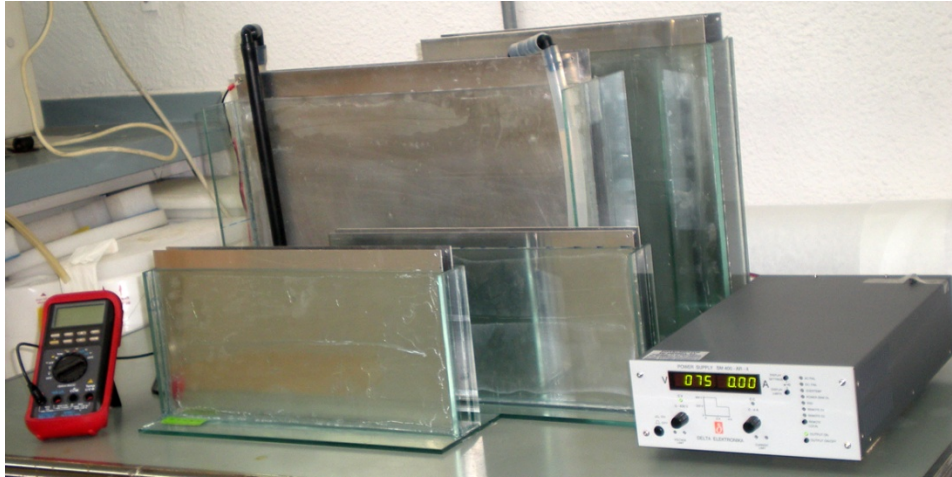


Fig.6.2. Fuente de alimentación, celdas de aluminio y multímetro electrónico

Las dimensiones de las celdas fueron:

- Aluminio

- 50 cm de largo x 35 de cm alto x 3,0 cm de separación entre placas,
- 40 x 37 x 4,7 cm,
- 40 x 18 x 2,1 cm,
- 40 x 18 x 1,4 cm

- Hierro

40 x 17x 2,2 cm.

En segundo lugar, se procedió a la realización de ensayos, a escala de laboratorio, encaminados a estudiar la influencia de las variables que intervienen en el proceso, como: la intensidad de corriente, conductividad, temperatura y las variaciones del pH resultante.

Igualmente se realizó un estudio sobre el efecto de la separación entre placas sobre la conductividad, intensidad de corriente, densidad de corriente, temperatura y voltaje. Para ello se sometió el agua del grifo del laboratorio, de conductividad alrededor de 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , a electrocoagulación en celdas con separación entre placas de 10,1; 9,0; 7,4 y 3,25 cm.

Por último se procedió a la realización de los ensayos, a nivel de laboratorio, encaminados a determinar el grado de cumplimiento de los sistemas de electrocoagulación respecto a las normativas actuales de reutilización, referentes a los parámetros fisicoquímicos como son: SS, turbidez, nitrógeno y fósforo.

Para la realización de esta fase se solicitó permiso al Canal Isabel II, para recoger muestras de agua del decantador secundario, no obteniendo el permiso, por lo que se decidió tomar el agua del río Manzanares aguas abajo de la depuradora de Viveros de la Villa, y en la salida de Madrid, aguas abajo de la depuradora de la China.



*Fig. 6.3. Lugar de toma de muestra en el Manzanares, aguas debajo de la depuradora La China*

En relación con los parámetros microbiológicos, se realizaron la determinación de coliformes totales y *E. coli*.

Por otro lado también se consideró interesante determinar el grado de eliminación de metales pesados, por lo que se preparó agua sintética conteniendo cobre, cromo, níquel, y cinc.

Basados sobre las pruebas experimentales a nivel laboratorio se realizó el diseño de la planta piloto de electrocoagulación de 144 l/h, que posteriormente se instalaría en la planta depuradora de aguas residuales Viveros de la Villa. Para el diseño de la planta piloto se tuvieron en cuenta los resultados de la primera etapa de investigación a nivel laboratorio, donde, como ya se ha señalado, se construyeron 4 celdas de vidrio con electrodos de placas de aluminio y 1 celda de hierro.

En esa fase previa de laboratorio, se había experimentado con agua del Río Manzanares aguas abajo de la depuradora de Viveros de la Villa, ya que esta agua es similar al agua del secundario. La DQO estaba comprendida en el intervalo de 19 – 47 mg/l, los SS de 12 a 20 mg/l, y la turbidez de 3,44 a 15,5 NTU. Datos que se consideraron para la construcción de la planta piloto.

Para diseñar un reactor a escala semi industrial era necesario que los parámetros claves de funcionamiento (agitación y la cinética de reacción) se mantuvieran a niveles comparables. Sin embargo se sabe que, tanto el diseño del reactor, como la base de las condiciones de operación, son muy diferentes entre un sistema batch (discontinuo) y un sistema en continuo, dando como resultado un comportamiento hidrodinámico y una cinética bastante diferente. Con el fin de lograr modelos similares de flujo dentro de un sistema de reactores, deben conservarse la similitud de la dinámica, cinética y geométrica (Coulson y Richardson, 1996). Zolotukhin (1989) adoptó este enfoque para escalar un sistema de electrocoagulación-flotación de laboratorio a escala piloto, y finalmente a escala industrial, pero no se han podido obtener los resultados.

Uno de los parámetros básicos de diseño a escala piloto, que he tomado en cuenta, es la relación de superficie electródica sobre el volumen de la disolución o del reactor a escala laboratorio (A/V), que es una medida del potencial para la liberación de coagulante y burbujas a un sistema (sobre una base volumétrica). La densidad de corriente, definida como la corriente por un área activa de electrodo, es otro parámetro de diseño de escalamiento que se utilizó.

En base a los resultados a nivel de laboratorio con los que se experimentó tenemos las siguientes relaciones (A/V):

-  $(A/V) = 66,67 \text{ m}^2/\text{m}^3$

-  $(A/V) = 47,62 \text{ m}^2/\text{m}^3$

-  $(A/V) = 33,33 \text{ m}^2/\text{m}^3$

-  $(A/V) = 21,27 \text{ m}^2/\text{m}^3$

Relacionando el rendimiento de la eliminación de la DQO, con el tiempo de electrocoagulación, en todos los reactores antes mencionados, se determinó un (A/V) óptimo. Para nuestro caso fue de  $21,27 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , y una densidad de corriente de  $95,61 \text{ A}/\text{m}^2$ , con un tiempo de electrocoagulación de 4 minutos. Para la misma relación (A/V), y un tiempo de electrocoagulación de 6 minutos se obtiene una densidad de corriente de  $68,29 \text{ A}/\text{m}^2$ . En ambos casos el rendimiento de eliminación de la DQO fue próximo a 70% y además se consiguió una eliminación de la turbidez del 91%. Hemos dado por válido estas relaciones de escalamiento porque los contaminantes y el tipo de reactor son similares.

La relación  $(A/V) = 21,27 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , y densidad de corriente de  $68,29 \text{ A}/\text{m}^2$  a nivel laboratorio permitió determinar la masa de aluminio disuelto por el proceso de electrocoagulación que fue de  $6,36 \text{ mg}/\text{m}^2$  área del electrodo, determinado según la ecuación (1). Con esta relación se trabajó hasta una densidad de corriente de  $196 \text{ A}/\text{m}^2$ .

$$m \text{ (gramos Al}^{3+}\text{)} = Q M/nF \quad (1)$$

Donde Q es la cantidad de electricidad que pasa por la celda en un determinado tiempo, M es el peso molecular del Al, n es el número de electrones intercambiados por la molécula o ion de sustancia, F es la constante de Faraday ( $96488 \text{ Culombios}/\text{mol}$ ).

Sobre ésta base se ha diseñado el nuevo reactor, no olvidando la necesaria versatilidad, de manera que se pueden colocar las placas a distintas distancias entre electrodos, y así poder estar dentro de las relaciones (A/V), determinadas a nivel laboratorio. El área efectiva del electrodo es de  $0,08181 \text{ m}^2$ . Si se colocan los electrodos a la misma distancia del área efectiva óptima determinada anteriormente, tenemos un volumen entre placas de  $0,00391865 \text{ m}^3$ , donde la

relación (A/V) es de 21,07 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Se puede trabajar desde 12,13 A/m<sup>2</sup> hasta 121,27 A/m<sup>2</sup>, y con un tiempo de electrocoagulación de 1,62 minutos por una sección o canal, menor al experimentado a escala laboratorio que fue de 4 minutos. Se experimentó también con dos secciones o canales por donde el agua circula en forma de S, por lo tanto podía elevarse el tiempo de retención a 3,24 minutos.

Con estos valores se realizarían los experimentos a escala piloto, obteniéndose buenos resultados como se puede observar en el capítulo de presentación de resultados.

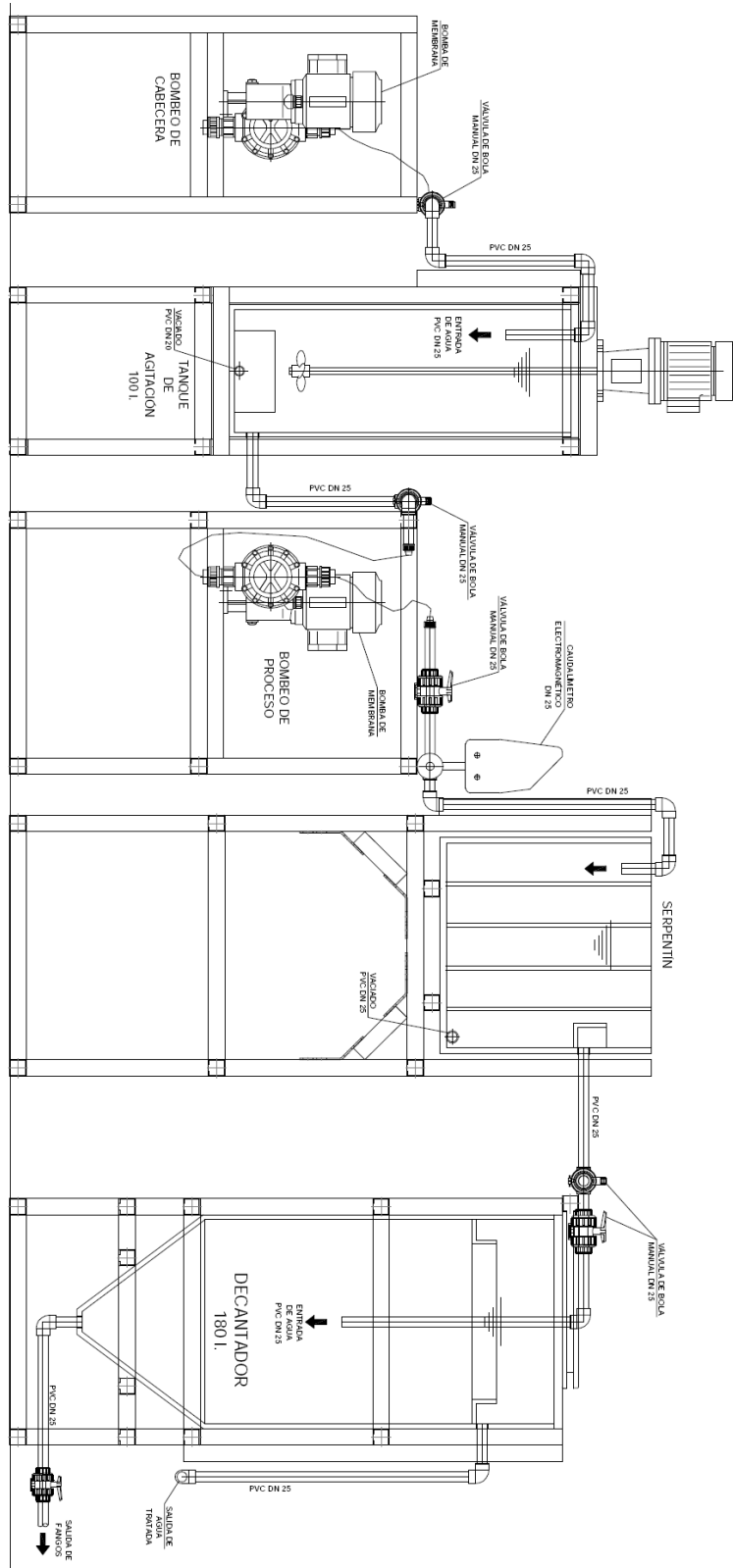
En el plano 2, se muestra el diseño previo de una línea de la unidad experimental. El volumen de agua a tratar se pasa secuencialmente a través de un depósito de pretratamiento, un depósito de procesamiento electroquímico, un depósito de post-tratamiento que puede pasar a un decantador o a un depósito de flotación.

El depósito de pretratamiento se dotará de un mecanismo de agitación, y conectados al mismo 3 depósitos de reactivos. En este depósito de pretratamiento se pueden ajustar el pH y la conductividad a valores apropiados para conseguir la optimización del tratamiento electroquímico.

El depósito de procesamiento electroquímico o electrocoagulador se concibe para poder ser conectado a una fuente de energía, básicamente consistirá en un depósito abierto cuyos lados laterales y el fondo están ranuradas con el fin de trabajar con distintas distancias entre electrodos.

El electrocoagulador se diseña para su construcción en metacrilato con unas dimensiones internas de 27,5 x 49,5 x 49,5 cm.

A continuación se muestra la línea de agua de la planta diseñada para su construcción.



Plano 2: Una línea de la planta piloto

Figura 6.4. Línea de la planta piloto



## 6.5. Metodología de trabajo, montaje de la planta, 3ª fase

La planta construida piloto consta de los siguientes elementos:

- 1 Bomba de impulsión
- 1 Tanque de agitación hecho en metacrilato 100 litros
- 1 Bomba de alimentación a celda electroquímica
- 1 Celda electroquímica tipo serpentín de metacrilato
- 1 Tanque decantador de metacrilato de 180 L
- 1 Tanque de flotación de metacrilato de 180 L
- 1 Soplante
- 4 tanques de reactivos de metacrilato
- 4 bombas dosificadoras de reactivos
- 1 Caudalímetro
- 2 Fuentes de alimentación
- 1 Cuadro eléctrico
- Electroodos tipo placa: hierro, aluminio, grafito

El agua de alimentación procedía del decantador secundario de donde era bombeado hacia el tanque de agitación, en el cual se procedía a medir los parámetros físicos y se añadía los reactivos si eran necesarios ajustarlos a las condiciones deseadas. Desde allí el agua era bombeada a la celda de electrocoagulación en donde se llevaba a cabo el proceso electroquímico, después de un cierto tiempo de retención fijado, el agua pasaba hacia el decantador donde la separación de los contaminantes eran por decantación. Por otro lado, el agua de la celda electroquímica podía pasar al tanque de flotación en donde se adicionaba aire mediante la soplante para la separación de los contaminantes por flotación. El agua clarificada de ambos tanques eran analizados en el laboratorio de la Cátedra de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

La planta piloto de electrocoagulación construida se compone de tres secciones:

- Sección de dosificación.
- Sección de alimentación – electrocoagulación.
- Sección de decantación – flotación.





*Figura 6.6. Vista parcial de la planta piloto de electrocoagulación*

### Sección de dosificación

Esta sección se compone de seis (6) depósitos con sus agitadores y sus bombas correspondientes. En estos depósitos se introduce el reactivo, o los productos correspondientes. A continuación las bombas lo impulsan hasta los depósitos de mezcla que alimentan los reactores de electrocoagulación.

Estos depósitos tienen las siguientes medidas internas (largo x ancho x profundo): 19,8 cm x 19,8cm x 35,4cm.



*Figura 6.7. Vista parcial de la zona de dosificación*

### Sección de alimentación – electrocoagulación

Esta sección está dividida en dos líneas iguales. Cada línea se compone de: una bomba de alimentación que introduce el agua a tratar en el depósito de mezcla, que, a su vez, recibe el reactivo correspondiente; un agitador para homogeneizar la mezcla de agua y reactivo. Mediante otra bomba se impulsa el agua mezclada al reactor electrocoagulador, donde se genera la electrocoagulación.

Los electrocoaguladores tienen unas dimensiones (internas) (largo x ancho x profundo): 49,5 cm x 27,5 cm x 37,7 cm. La celda o reactor consiste en un tanque serpentín de metacrilato que lleva unas ranuras en las paredes laterales (largo) y en el fondo que sirven para sujetar las placas, que se distribuyen en forma paralela, por donde el agua circula en forma de S. Las placas se pueden colocar a distintas distancias.

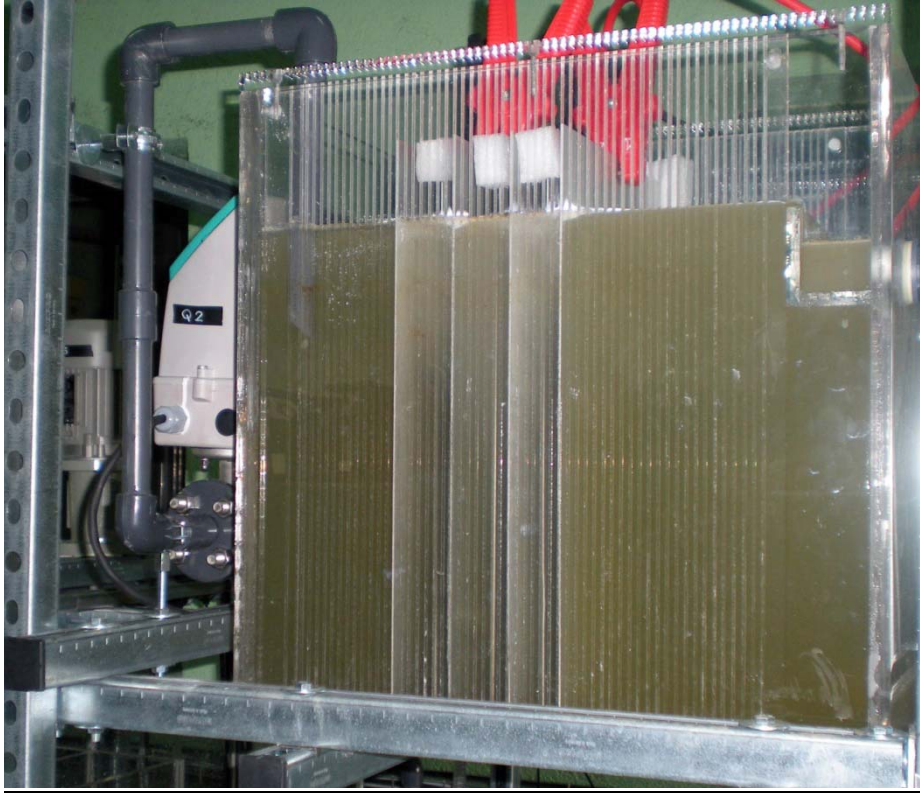
Las dimensiones de las placas-electrodos de aluminio son de 250 x 500 x 1,5 mm; las de acero tienen unas dimensiones de 250 x 500 x 1,00 mm, y las placas de grafito 250 x 550 x 4 mm.

En un electrocoagulador se han colocado placas de aluminio y en las otras placas de acero.



*Figura 6.8. Vista de los tanques de alimentación y los electrocoaguladores*





*Figura 6.9. Vista del electrocoagulador*

### Sección de decantación – flotación

Esta sección se compone de un tanque decantador de metacrilato de 180 litros, y de un tanque flotador también de metacrilato de 180 litros, el cual tiene un sistema de aireación que consta de un plato difusor y de una soplante. Tanto el decantador como el flotador pueden recibir el agua tratada que sale de cada electrocoagulador.



*Figura 6.10. Vista del decantador y flotador*

### **6.5.1. Aparatos y equipos utilizados**

En la planta piloto quedan integrados los siguientes equipos:

- 2 fuentes de alimentación, Delta electrónica® SM-300-10D, de 300 V- 10 A.



*Figura 6.11. Fuentes de alimentación*

- Un cuadro eléctrico

- Un módulo de sonda con pantalla multiparamétrica marca Lange sc 1000, en donde se han conectado los siguientes instrumentos, 2 sensores de conductividad, 2 sensores de pH, 2 sensores de oxígeno disuelto.





Figura 6.12. Pantalla multiparamétrica

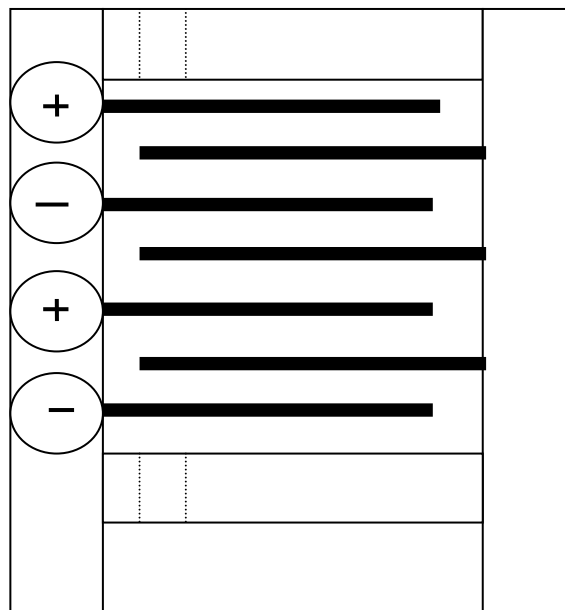
- 4 bombas dosificadoras de membrana MB-120, marca OBL, de 120 l/h
- 4 bombas dosificadoras RBB, marca OBL de 2 l/h
- 2 bombas dosificadoras RCA-RC, marca OBL de 0,23 l/h
- 4 caudalímetros MAG-1100, con pantalla visualizadora marca SIEMENS.
- Un agitador marca SIEMENS de 850 rpm.
- Una soplante marca MAPNER
- 6 agitadores de varilla Nahita, serie 686 de 200-1000rpm.

## 6.6. Fase experimental de la 3ª fase

Esta fase experimental arranca, después de realizar las pruebas funcionales de la planta piloto construida, con circulación de caudal en continuo.

En una primera serie de experimentos se establecen 4 placas de electrodo, 2 cátodos y 2 ánodos, y 3 placas intermedias, todas de aluminio, como se muestra en la figura siguiente. De la misma forma se trabajó en la segunda línea pero con placas de hierro. Las dimensiones de las placas de aluminio fueron de 250 x 500 x 1,5 mm, igual que las placas de hierro, pero con separación de electrodos de 1,0 mm. El área efectiva total fue de 37,7 cm x 21,7 cm = 818,1 cm<sup>2</sup> y el espacio entre electrodos fue de 4,75 cm aproximadamente.

Los electrodos fueron conectados a una fuente de alimentación que tenía una salida de 300 V y 10 A.



*Fig. 6.13. Reactor con placa intermedia*

En otra serie de experimentos se han quitado las placas intermedias y se han experimentado sin ellas manteniendo la misma separación entre electrodos, tanto en la línea de aluminio como en la línea de acero.

En una tercera línea experimental, se complementa la investigación realizando los ensayos planificados para alcanzar los objetivos previstos, combinando electrodos de placas de grafito con electrodos de aluminio en la línea 1, y con electrodos de acero en la segunda línea. Las placas de grafito tenían unas dimensiones de 250 x 550 x 4mm.

Por otro lado, se ha contemplado que la oxidación indirecta con ánodos de grafito es ampliamente utilizado en el proceso de decoloración de aguas residuales de tintura. Es por ello que se experimentó con grafito, utilizándolo como cátodo. Pese a no estar previsto en los objetivos iniciales de la investigación, después de la revisión bibliográfica realizada se consideró interesante realizar unas pruebas iniciales a fin de comprobar la eficacia de remoción de contaminantes.

El caudal de entrada a las celdas de electrocoagulación se podía variar regulando las bombas dosificadoras según los requerimientos deseados, desde 10 a 100% del caudal. El caudal máximo que entraba a las celdas donde se dispusieron los electrodos de Al y Fe era de 144 l/h aproximadamente. Se ha experimentado también con el 50% del caudal máximo, en ambas celdas.

El tiempo de retención entre electrodos se calculó según la ecuación:

$$Tr = V_{(p)}/Q,$$

Donde  $V_{(p)}$  es el volumen entre placas y Q el caudal en l/h.

El tiempo de retención era de 1,62 minutos, por canal, y como se ha trabajado con 2 canales idénticos, el tiempo de retención total es de 3,24 minutos a caudal máximo.

El agua electrocoagulada, que sale de los electrocoaguladores, puede pasar a un decantador o a un flotador para su clarificación bien sea por sedimentación o separación por flotación por aire disuelto. Ambos tanques, decantador y flotador tienen, un volumen de 180 litros, por lo tanto el tiempo de retención en el decantador o flotador, ( $t = V/Q$ ), es de 1,25 horas.

Todas las experimentaciones se realizaron a temperatura ambiente. La intensidad de corriente y los voltajes han sido variados para realizar una comparación de la eficiencia de eliminación de los contaminantes presentes en el agua residual, según los objetivos propuestos en el presente proyecto.

El tratamiento en continuo duraba 1,30 horas. Al cabo de este tiempo se tomaban las muestras, se dejaban decantar durante una hora y se llevaban al laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la E.T.S.I. de Caminos para su posterior análisis. Después de cada experimentación se lavaban las celdas con agua potable con el fin de eliminar las impurezas y dejarlo limpio para la siguiente experimentación.

Los experimentos se han realizado tomando en cuenta los siguientes objetivos:

1. Profundizar en el conocimiento de la tecnología de electrocoagulación, estudiando la influencia de las siguientes variables en el proceso:
  - Intensidad eléctrica
  - Caudal de agua tratada
  - Conductividad
  - Valor del pH
  - Temperatura
  - Materiales de las placas de electrodo y conductoras.
  - Combinación de las placas de electrodo y conductoras (configuración del reactor).
  
2. Verificar el grado de cumplimiento de los sistemas de electrocoagulación respecto a las normativas actuales de reutilización. Con el fin de reutilizar el agua residual depurada en base al estudio de los siguientes aspectos:
  - Reducción de parámetros físico-químicos de las aguas (SS, turbidez, nitrógeno y fósforo)
  - Reducción de la contaminación biológica de las aguas (E.coli, Legionella, presencia de parásitos como nemátodos y tenia)
  
3. Verificar el rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación en relación con la modificación de la dureza del agua

4. Verificar el rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación en relación con la modificación de la conductividad de las aguas efluentes del secundario.
5. Diseño y construcción de una planta piloto a nivel semiindustrial.
6. Estudio energético del proceso de electrocoagulación.



## **CAP. 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS**







## **7. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Para analizar los resultados se seguirá el orden establecido en el planteamiento de objetivos. Así se habían planteado, como objetivos iniciales:

### **7.1. Objetivos planteados a lo largo de la investigación**

#### **Fase 1ª**

- F1.1. Desarrollar un trabajo de investigación, a nivel laboratorio, con el fin de optimizar los parámetros de diseño y extrapolarlo a escala piloto.
- F1.2. Con los resultados obtenidos, las experiencias adquiridas realizar el diseño y montaje de una planta piloto
- F1.3. Con la investigación previa aumentar el conocimiento fisicoquímico de la electrocoagulación, sobre todo buscando su aplicación práctica. Establecer la influencia, en el proceso, de la intensidad, de la conductancia, del voltaje, de la separación de placas, de la densidad de corriente.
- F1.4. Investigar sobre la Influencia de la electrocoagulación sobre parámetros físicos (pH, conductividad)
- F1.5. Investigar sobre la eficacia de la electrocoagulación en la eliminación de turbidez
- F1.6. Investigar sobre la eficacia de la electrocoagulación en la eliminación la DQO y absorción UV.
- F1.7. Investigar sobre la eficacia de la electrocoagulación en la reducción de aniones (nitratos y sulfatos)
- F1.8. Investigar sobre la eficacia de la electrocoagulación en la eliminación de cationes
- F1.9. Investigar sobre los efectos de la electrocoagulación sobre las aguas captadas para abastecimiento, procedentes de un embalse de la Comunidad de Madrid y de una zona de aguas duras.
- F1.10. Investigar sobre los efectos de la electrocoagulación sobre aguas residuales depuradas.

- F1.11. Investigar sobre rendimientos de diferentes equipos de electrocoagulación con elementos planos.
- F1.12. Diseño de planta optimizada experimental de electrocoagulación.

### **Fase 2ª**

Los hitos en los que se desglosó la investigación fueron los siguientes.

- F2.1. Adquisición de material necesario para la investigación a escala laboratorio y planta definitiva de investigación.
- F2.2. Puesta a punto del Laboratorio.
- F2.3. Diseño y montaje de reactores a escala de laboratorio, primeros ensayos choques.
- F2.4. Ensayos a escala de laboratorio encaminados a estudiar la influencia de las variables que intervienen en el proceso.
  - Intensidad eléctrica
  - Temperatura
  - Materiales de las placas de electrodo y conductoras

Los estudios realizados en esta segunda fase, al igual que los realizados en la primera fase, serán experiencias en un sistema discontinuo, batch. La influencia del caudal se determinará cuando se disponga de la planta piloto, en la fase 3.

- F2.5. Ensayos a nivel de laboratorio encaminados a determinar el grado de cumplimiento de los sistemas de electrocoagulación, en relación con la normativa actual de reutilización.
- F2.6. Reducción de parámetros físico-químicos de las aguas (SS, turbidez, nitrógeno y fósforo)
- F2.7. Reducción de la contaminación biológica de las aguas.
- F2.8. Ensayos a nivel de laboratorio encaminados a determinar el rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación en relación con la modificación de la dureza del agua
- F2.9. Ensayos a nivel de laboratorio encaminados a determinar el rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación en relación con la modificación de la conductividad de las aguas efluentes del secundario.

- F2.10. Diseño definitivo de la planta piloto para desarrollo experimental con caudal circulante en continuo.
- F2.11. Diseño y construcción de la planta experimental, realizando gestiones para su instalación en la planta depuradora de aguas residuales de Viveros.

### **Fase 3ª**

- F3.1 Profundizar en el conocimiento de la tecnología de electrocoagulación, estudiando la influencia de las siguientes variables en el proceso:
  - Intensidad eléctrica.
  - Caudal del agua tratada.
  - Tiempo de retención
  - Variación del pH.
  - Temperatura.
  - Materiales de las placas de electrodo y conductoras.
  - Combinación de las placas de electrodos y conductoras.
- F3.2 Verificar el grado de cumplimiento de los sistemas de electrocoagulación respecto a las normativas actuales de reutilización.
  - Reducción de parámetros físico-químicos de las aguas (SS, turbidez, nitrógeno y fósforo).
  - Reducción de la contaminación biológica de las aguas (E. coli y coliformes totales).
- F3.3. Verificar el rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación en relación con la modificación de la dureza del agua
- F3.4 Verificar el rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación en relación con la modificación de la conductividad de las aguas efluentes del secundario.
- F3.5 Diseño y construcción de una planta piloto a nivel semiindustrial.
- F3.6. Estudio energético del proceso de electrocoagulación

## 7.2. Resultados obtenidos de la 1ª Fase, de “Ensayos choque”

### 7.2.1. En relación con la eliminación de sulfatos y nitratos. (Objetivo F1.7)

Según las experiencias nº 1 a nº 4, los resultados obtenidos pueden sintetizarse en la siguiente tabla:

Experiencia 1ª	Experiencia 2ª	Experiencia 3ª	Experiencia 4ª
Voltaje V 12	Voltaje V 12	Voltaje V 36	Voltaje V 3
I/S A/m <sup>2</sup> 42	I/S A/m <sup>2</sup> 35	I/S A/m <sup>2</sup> 31	I/S A/m <sup>2</sup> 1
Sin efecto apreciable sobre sulfatos y nitratos	Efecto reductor de sulfatos en un 10%	Efecto reductor de sulfatos en un 52%	Efecto reductor de sulfatos en un 11%
Elevación de la temperatura en 0,8°C, 0,13°C/m	Efecto reductor de nitratos poco significativo	Efecto reductor de nitratos en un 68%	Efecto reductor de nitratos poco significativo
Alcalinización, pasa el pH de 6,9 a 8,88	Elevación de la temperatura en 0,9°C, 0,18°C/m	Elevación de la temperatura en 9,2°C, 1,53°C/m	Elevación de la temperatura en 0,2°C, 0,03°C/m
Incremento del ión aluminio en las aguas	Alcalinización, pasa el pH de 6,78 a 8,44	Alcalinización, pasa el pH de 6,15 a 10,47	Acidificación, pasa el pH de 6,42 a 5,81
Descenso de la conductividad	Incremento del ión aluminio en las aguas	Descenso de la conductividad en un 25%	Descenso de la conductividad en un 17%
	Descenso de la conductividad en un 10%		

Tabla 7.1. Sobre eliminación de sulfatos y nitratos

#### Conclusiones:

C-1 La eliminación de sulfatos y nitratos (52% y 68% respectivamente), es notable a voltajes e intensidad de corriente altos, (40 V., 31 A/m<sup>2</sup>).

C-2 A voltajes elevados se produce elevación de la temperatura significativa.

C-3 Se produce un incremento significativo del pH, dándose el efecto contrario para voltaje e intensidad bajos, (3 V, 1 A/m<sup>2</sup>)

C-4 Descenso de la conductividad entre el 10% y el 25%.

## 7.2.2. En relación con la eliminación de fósforo en fosfatos. (Objetivo F2.6)

Según las experiencias 6 y 7, se pueden concretar los resultados en la siguiente tabla.

Experiencia 6ª	Experiencia 7ª
Voltaje V 35	Voltaje V 12
I/S A/m <sup>2</sup> Descendiendo de 12 hasta 2	I/S A/m <sup>2</sup> Descendiendo de 0,8 a 0,0
Reducción de fosfatos del 50%, con casi la misma reducción en el primer minuto, periodo en el que pasan de 12,24 a 6,86 los A/m <sup>2</sup>	Reducción de fosfatos nula.
La temperatura se eleva en 0,5°C, 0,083°C/m	La temperatura se eleva en 0,1°C, 0,016°C/m
La alcalinización es ligera, pasando el pH de 8,10 a 8,32	La acidificación es ligera, pasando el pH de 8,20 a 7,99
Sin modificación apreciable en conductividad	Sin modificación apreciable en conductividad

Tabla 7.2. Sobre eliminación de fósforo en fosfatos

### Conclusiones:

C-5 La eliminación de fósforo en fosfatos (50%) es notable a voltajes de 35 V e inferior a 12 A/m<sup>2</sup>.

C-6 A voltajes elevados se produce elevación de la temperatura significativa.

C-7 Se produce un incremento significativo del pH, dándose el efecto contrario para voltaje e intensidad bajos, (12 V, bajando de 0,8 a 0,0 A/m<sup>2</sup>)

### 7.2.3. En relación con la eliminación sulfatos, nitratos, de fósforo en fosfatos, DQO, e incremento de iones de aluminio en las aguas. (Objetivos F1.7, F1.9)

De los ensayos 8 a 14, los resultados pueden concretarse en la siguiente tabla:

Experiencia 8ª	Experiencia 9ª	Experiencia 10ª	Experiencia 11ª	Experiencia 12ª	Experiencia 13ª	Experiencia 14ª
Voltaje V 25	Voltaje V 12	Voltaje V 16	Voltaje V 50	Voltaje V 100	Voltaje V 150	Voltaje V 200
I/S A/m <sup>2</sup> 42	I/S A/m <sup>2</sup> 19	I/S A/m <sup>2</sup> 104	I/S A/m <sup>2</sup> 110	I/S A/m <sup>2</sup> 165	I/S A/m <sup>2</sup> 230	I/S A/m <sup>2</sup> 320
Sin reducción de sulfatos	Sin reducción de sulfatos	Sin reducción de sulfatos	Sin reducción de sulfatos	Sin reducción de sulfatos	Sin reducción de sulfatos	Sin reducción de sulfatos
Reducción poco significativa de nitratos	Reducción poco significativa de nitratos	Reducción poco significativa de nitratos	Reducción poco significativa de nitratos	Reducción poco significativa de nitratos	Reducción poco significativa de nitratos	Reducción poco significativa de nitratos
Reducción de fosfatos escasamente definida.	Reducción de fosfatos escasamente definida.	La temperatura se eleva en 2,6°C, 0,34°C/m	La temperatura se eleva en 7,0°C, 1,16°C/m	La temperatura se eleva en 7,9°C, 3,95°C/m	La temperatura se eleva en 7,3°C, 16,2°C/m	La temperatura se eleva en 7,3°C, 16,2°C/m
La temperatura se eleva en 1,7°C, 0,28°C/m	La temperatura se eleva en 1,7°C, 0,28°C/m	La alcalinización ligera, pasando el pH de 7,84 a 8,02	La alcalinización ligera, pasando el pH de 8,3 a 8,48	La alcalinización ligera, pasando el pH de 7,65 a 8,40	La alcalinización ligera.	La alcalinización ligera.
La alcalinización ligera, pasando el pH de 7,45 a 8,02	La alcalinización ligera, pasando el pH de 7,28 a 7,56	Sin reducción en DQO	Sin reducción en DQO	Reducción en DQO del 37%, en 2 minutos.	Sin reducción en DQO	Reducción en DQO en un 57%.
Sin reducción en DQO	Sin reducción en DQO	Con reducción apreciable en conductividad, descenso de un 10%.	Con reducción apreciable en conductividad, descenso de un 10%.	Con reducción apreciable en conductividad, descenso de un 5%.	Sin reducción apreciable en conductividad.	Con reducción apreciable en conductividad, descenso de un 10%.
Con reducción apreciable en conductividad, descenso de un 12,8%.	Con reducción apreciable en conductividad, descenso de un 10%.	Ligero incremento del ión aluminio.	Ligero incremento del ión aluminio.	Ligero incremento del ión aluminio.	Ligero incremento del ión aluminio.	Ligero incremento del ión aluminio.
	Ligero incremento del ión aluminio.		Generación de flotantes importante.			

Tabla 7.3. Sobre eliminación de sulfatos, nitratos, fósforo en fosfatos, DQO, incremento Al

## Conclusiones:

C-8 La eliminación de sulfatos, nitratos y fosforo en fosfatos es prácticamente nula, variando el voltaje y la intensidad entre 12 y 200 V, y (19 y 320 A/m<sup>2</sup>).

C-9 A voltajes elevados se produce elevación de la temperatura significativa.

C-10 La alcalinización varía ligeramente entre 12 y 200 V, y (19 y 320 A/m<sup>2</sup>).

C-11 Con reducción de la DQO, entre el 37% y el 50% para voltajes entre 100 y 200 V, y entre 200 y 320 A/m<sup>2</sup>.

C-12 La reducción de la conductividad entre un 5% y un 12,8%.

C-13 Se observa una ionización de Al ligera.

### 7.2.4. En relación con la eliminación de microorganismos. (Objetivo F2.7)

De las experiencias 10 a 14, pueden desprenderse los siguientes resultados, que se concretan en la siguiente tabla.

Experiencia 10 <sup>a</sup>	Experiencia 11 <sup>a</sup>	Experiencia 12 <sup>a</sup>	Experiencia 13 <sup>a</sup>	Experiencia 14 <sup>a</sup>
Voltaje V 16	Voltaje V 50	Voltaje V 100	Voltaje V 150	Voltaje V 200
I/S A/m <sup>2</sup> 104	I/S A/m <sup>2</sup> 110	I/S A/m <sup>2</sup> 165	I/S A/m <sup>2</sup> 230	I/S A/m <sup>2</sup> 320
Reducción en conformes totales del 57%	Reducción en conformes totales del 100%, en seis minutos.	Reducción en conformes totales del 82%, en 2 minutos.	Reducción en conformes totales del 94%, en los 15 primeros segundos, con tendencia a incrementarse a partir de ese momento.	Reducción en conformes totales del 72%, en 45 segundos, máximo rendimiento del 86%, en 30 segundos.
Reducción de E. Coli del 67%	Reducción de E. Coli del 100%	Reducción de E. Coli del 83%		
	Generación de flotantes importante.			

Tabla 7.4. Sobre eliminación de microorganismos

## Conclusiones:

C-14 La eliminación de microorganismos es importante. El óptimo se ha obtenido para 50 V, y 104 de I/S A/m<sup>2</sup>, observándose la eliminación total de coliformes totales y E.coli.

### 7.2.5. Efecto de la separación de placas. (Objetivos 1.3 y 2.4)

Según la experiencia 16, los resultados obtenidos pueden concretarse en los siguientes gráficos:

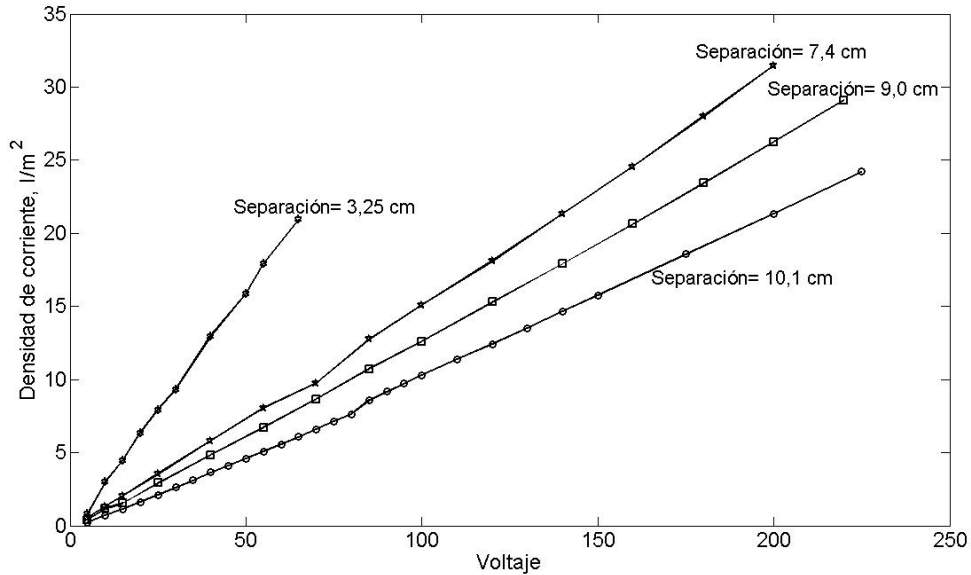


Figura 7.1. Representación de la densidad de corriente obtenida en función del voltaje y la separación de placas en la electrocoagulación.

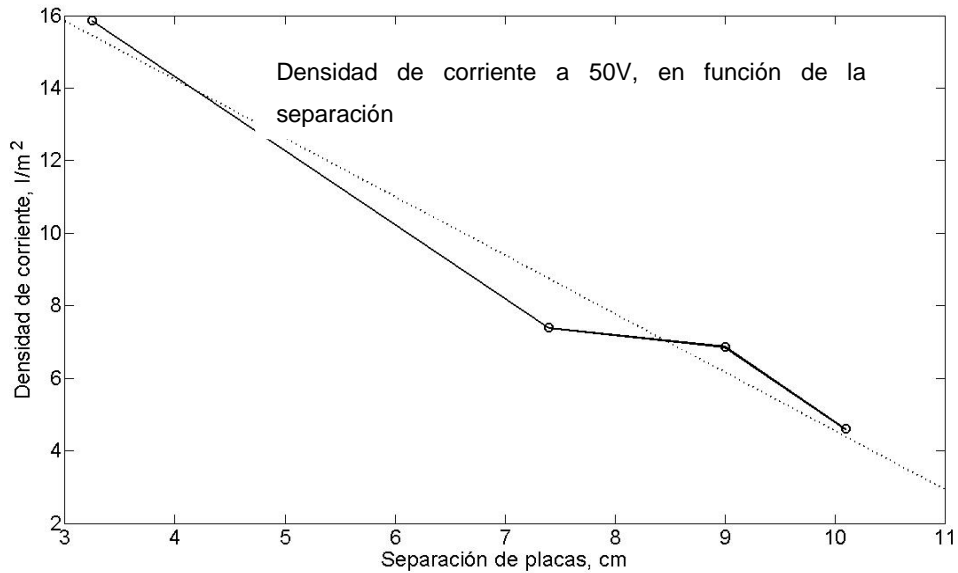


Figura 7.2. Densidad de corriente en función de la separación de las placas del electrocoagulator, a voltaje constante.



Otros resultados de interés pueden encontrarse en la siguiente tabla.

Separación entre placas	10,1 cm	9,0 cm	7,4 cm	3,25 cm
Densidad de corriente				
5 V	0,232 A/m <sup>2</sup>	0,401 A/m <sup>2</sup>	0,540 A/m <sup>2</sup>	0,843 A/m <sup>2</sup>
40 V	3,665 A/m <sup>2</sup>	4,830 A/m <sup>2</sup>	5,818 A/m <sup>2</sup>	12,951 A/m <sup>2</sup>
100 V	10,309 A/m <sup>2</sup>	12,593 A/m <sup>2</sup>	15,085 A/m <sup>2</sup>	
200 V	21,336 A/m <sup>2</sup>	26,258 A/m <sup>2</sup>	31,466 A/m <sup>2</sup>	
Temperatura °C				
5 V	14,4	18,2	19,4	21,0
40 V	14,5	18,3	19,5	21,2
100 V	15,1	18,5	19,8	
200 V	16,1	20,1	22,1	
Conductividad μS/cm,				
5 V	101,0	103,7	102,3	101,7
40 V	98,7	102,7	98,2	99,8
100 V	97,1	102,5	97,8	
200 V	98,8	101,7	99,1	

Tabla 7.5. Sobre influencia de la separación de placas

#### Conclusiones:

C-15 La densidad de corriente aumenta, al aumentar el voltaje, y aumenta al disminuir la separación entre placas.

C-16 La densidad de corriente disminuye, al aumentar la separación de placas, según una recta.

C-17 Para cada separación de placas, la temperatura del agua se incrementa al incrementar el voltaje.

C-18 El incremento de temperatura, al aumentar el voltaje, se incrementa al reducir la separación de las placas.

C-19 Al incrementar el voltaje, para cada separación de placas, la conductividad se reduce de forma leve.

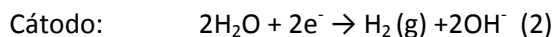
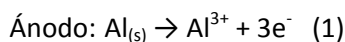
### 7.2.6. Influencia de los parámetros físicos (pH, conductividad) (Objetivo F1.4)

En relación con el objetivo, variación del pH, y la conductividad, puede deducirse de la investigación realizada, lo siguiente:

**El pH**, juega un rol importante en el desarrollo de la EC. El pH óptimo está entre 5 – 9. En la presente investigación se ha podido observar que el pH del efluente, después del tratamiento por EC, se ha incrementado ligeramente en todos los casos. Esta variación ligera puede deberse a la capacidad tampón del sistema de EC, ya que hay un balance, entre la producción y consumo de iones  $\text{OH}^-$ , que impide los cambios bruscos del pH. Este efecto tampón se observó a pH cercano a 7, que fue el pH del influente que se mantenía en la planta piloto.

Cuando se trabaja con electrodos de aluminio a pH de entre 4-9, se forman especies monoméricas, como  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ;  $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$ ; y poliméricas como  $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$ ;  $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$ ;  $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ ; que finalmente se transforman en un sólido amorfo de  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , a través de la cinética de polimerización/precipitación [Bayramoglu, et al., 2007].

El mecanismo de reacción que se da en el ánodo y cátodo son los siguientes:



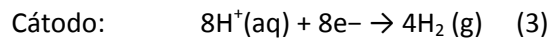
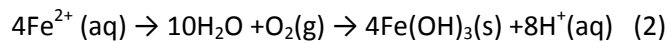
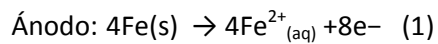
Se observó en ambos casos, tanto con electrodos de aluminio, como con los de hierro, que los flóculos eran más estables en planta piloto, en relación a la experimentación a escala laboratorio, donde muchas veces los flóculos no fueron estables. Se puede decir que los flóculos formados arrastran los contaminantes por adsorción, ya que, con carácter general, precipitan, dejando el agua bastante clarificada, como puede observarse en la siguiente foto.



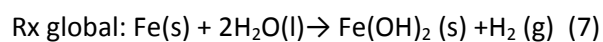
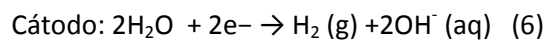
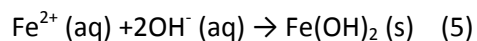
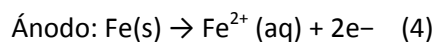
Figura 7.3. Agua clarificada procedente de la celda de aluminio

Para el caso del hierro (Fe), existen 2 mecanismos, que dependen del pH.

Primer mecanismo generación de  $\text{Fe(OH)}_3$



Segundo mecanismo generación del  $\text{Fe(OH)}_2$ :



Este segundo mecanismo se observó a intensidades de más de 5 A. En esos casos el agua que salía del electrocoagulador era de color verde, y con abundantes flóculos, que rápidamente se aglomeraban, formando coágulos más grandes y precipitando. Sin embargo el clarificado, conforme pasaba el tiempo, se oxidaba con el oxígeno del aire y se ponía de color amarillo

naranja. En cambio el precipitado mantenía su color verde oscuro. Como se observa en la foto siguiente. El líquido sobrenadante mantenía su color amarillento, por muchas horas. Solo a las 24 horas el clarificado era transparente.



*Figura 7.4. Efluente procedente del electrocoagulador de hierro. El primero a los 3 minutos de decantación y los segundos a los 30 minutos de decantación*

También se observó en planta piloto que cuando se trabajaba a intensidades de corriente de entre 7 y 9 A, el incremento del pH fue mayor que cuando de trabajó con menores intensidades de corriente.

Cuando se trabajó con soluciones ácidas, a nivel laboratorio, se observó una variación del pH más elevado. En cuanto a las muestras alcalinas, como eran las aguas del río Tajo, que tenía un pH inicial de 8 y después del tratamiento por EC, disminuyó a pH 7,4.

**La conductividad eléctrica**, como medida del contenido de iones, durante la electrocoagulación en planta piloto, utilizando placas intermedias, disminuyó ligeramente en todas las experiencias. Mientras que sin placa intermedia a altas intensidades de corriente de 7 y 9 A, aumentó ligeramente, tanto con electrodos de aluminio como de hierro. Con las demás intensidades disminuyó ligeramente.

**En cuanto a la temperatura,** en experiencias a nivel laboratorio, se observó que la temperatura se incrementaba al aumentar el voltaje y el tiempo de retención, aumentando con ello la eficiencia de eliminación de los contaminantes. Pero también, según aumentaba la temperatura del agua electrocoagulada, los flóculos eran más esponjosos, dando lugar a un volumen decantado a los 30 minutos muy grande, con un clarificado muy bueno.

Mientras que a nivel de planta piloto, se observó que la temperatura se incrementaba cuando se aumentaba el voltaje. El incremento en toda la experimentación no fue muy acusado, lo máximo que aumentó fue en 3 grados, con la máxima intensidad de corriente (9 Amperios).

### 7.2.7. Eficacia de la electrocoagulación en la eliminación de la turbidez (Objetivos F1.5 y F2.5)

#### Experimentación con placa intermedia

Durante la experimentación, la turbidez del efluente secundario que servía de alimento a la planta piloto osciló desde 3,5 a 20,5 NTU. El efluente tratado con **electrodos de aluminio** alcanzó un rendimiento promedio de más de 90%, cuando se trabajó con intensidades de corriente de 3 – 7 A. Con estas intensidades de corriente se alcanzó una reducción en promedio de la turbidez desde 12,2 NTU hasta 1,09 NTU. Para intensidades de 1 A, el rendimiento fue muy bajo, y para 9 A, fue del 88% en promedio.

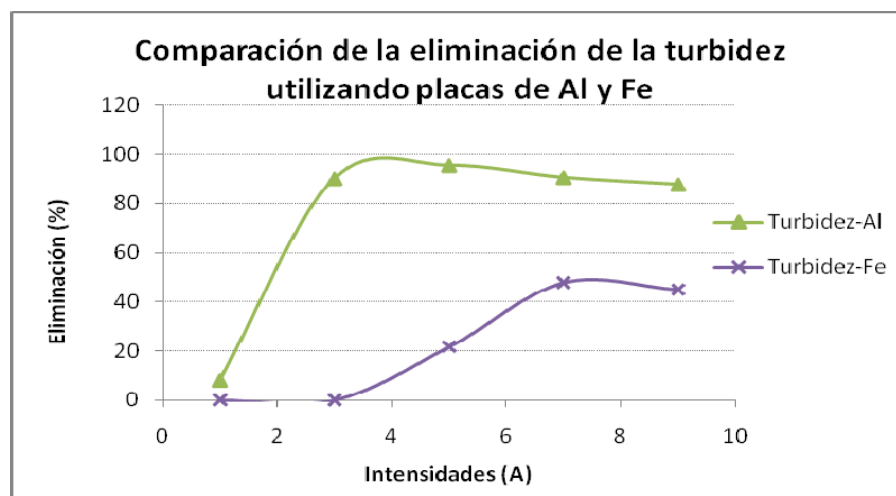


Figura 7.5. Eliminación de turbidez con electrodos de aluminio y hierro, con placa intermedia

Cuando se trabajó con **electrodos de hierro con placa intermedia**, a bajas intensidades (1-3 A) la turbidez se incrementó en más del 200%. El agua de salida era de color naranja oscuro que tardaba mucho tiempo en decantar, pero siempre el clarificado presentaba un color naranja, y se observaban abundantes partículas muy pequeñas en el sobrenadante que eran responsables del incremento de los SS y la turbidez. A partir de 5 A, el agua de salida era de color verde oscuro y se formaban muy rápidamente los coágulos, es decir, las partículas se agrupaban casi de inmediato y precipitaban dejando un clarificado ligeramente verdoso que con el tiempo se ponía de color naranja. El precipitado permanecía por un tiempo más prolongado con su coloración verdosa, y con el tiempo la superficie que estaba en contacto con el agua se tornaba de color marrón naranja y el del fondo era verde oscuro. Bukhari A., (2008), ya señalaba que la eliminación de los contaminantes, cuando en la solución está el hierro en estado ferroso ( $Fe^{2+}$ ), es por el mecanismo de neutralización de carga.

Se obtuvo un rendimiento en la turbidez del 48 y 45% a intensidades de corriente de 7 y 9 A, correspondientes a 4,5 NTU.

Conclusiones:

C-20 Con placa intermedia, la eliminación de turbidez con placas de aluminio es superior a la lograda con placas de hierro. Utilizando placas de aluminio, con intensidades entre 2,5 y 4,5 A, el rendimiento es superior al 90%, y entre 4,5 y 9,0 A superior al 85,5%.

C-21 Con placa intermedia y con placas de hierro, los mejores rendimientos se obtienen para intensidades entre 6,5 y 9,0 A, con rendimientos entre el 45% y el 48%.

### **Experimentación sin placa intermedia,**

**Con electrodos de aluminio** se consiguió un rendimiento por encima del 80% de eliminación de la turbidez, en todos los casos. Según la normativa de reutilización de las aguas, dependiendo de sus usos, el agua obtenida, con intensidades de corriente a partir de 3 A, alcanzó una reducción importante de la turbidez con valores resultantes por debajo de 2 NTU, siendo apta para la reutilización del agua tratada para usos urbanos, calidad 1.1 Residencial: riego de jardines privados y descarga de aparatos sanitarios, cuyo límite es de 2 NTU.

Cuando se trabajó con electrodos de hierro sin placa intermedia, la turbidez se incrementó tanto por el color que mantenía el líquido clarificado como por las partículas muy finas que quedaban en suspensión.

Todo lo anterior queda reflejado en el siguiente gráfico.

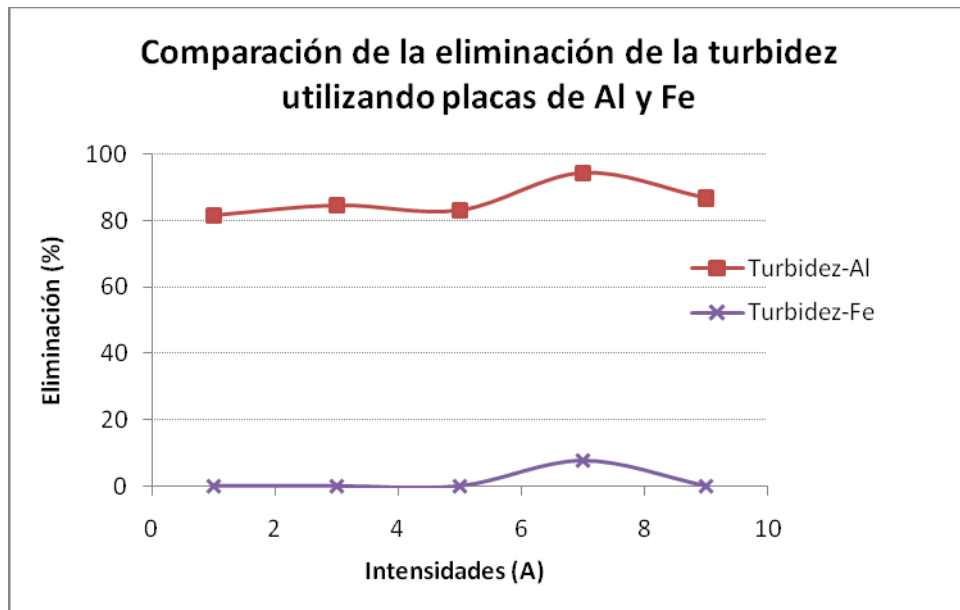


Figura7.6. Eliminación de turbidez con electrodos de aluminio y hierro, sin placa intermedia

Conclusiones:

C-22 Sin placa intermedia, la eliminación de turbidez con placas de aluminio es superior a la lograda con placas de hierro. Utilizando placas de aluminio, con intensidades entre 1,0 y 9,0 A, el rendimiento es superior al 80%, alcanzando el máximo rendimiento del 93% para una intensidad de 7,0 A.

C-23 Sin placa intermedia y con placas de hierro, la turbidez se incrementó tanto por el color que mantenía el líquido clarificado como por las partículas muy finas que quedaban en suspensión.

C-24 Con placas de aluminio, según la normativa de reutilización de las aguas, dependiendo de sus usos, el agua obtenida, con intensidades de corriente a partir de 3 A, alcanzó una reducción importante de la turbidez con valores resultantes por debajo de 2 NTU, siendo apta para la reutilización del agua tratada para usos urbanos, calidad 1.1 Residencial: riego de jardines privados y descarga de aparatos sanitarios, cuyo límite es de 2 NTU.

### **Experimentación con electrodos de aluminio y hierro con placas de grafito como cátodo.**

En todos los casos se trabajó sin placa intermedia. La eliminación de la turbidez cuando se trabajó con **electrodos de aluminio y grafito**, estuvo entre 80 – 92% en todos los rangos de densidades de corriente experimentado, y se alcanzó valores medios e la turbidez inferiores a NTU. Según la normativa de reutilización de las aguas según sus usos, el agua obtenida en esta experimentación se considera apta para la reutilización en todos los usos, excepto para uso industrial, calidad 3.2, que fija como límite máximo 1 NTU.

Con **electrodos de hierro-grafito** la turbidez se incrementó, salvo cuando se trabajó a 9 A, donde la turbidez se eliminó en un 48%. El agua obtenida sería válida únicamente para distintos usos cuando por la normativa no se fijan límites, ya que muchas veces fue mayor que el agua de entrada.

Los resultados quedan reflejados en el siguiente gráfico.

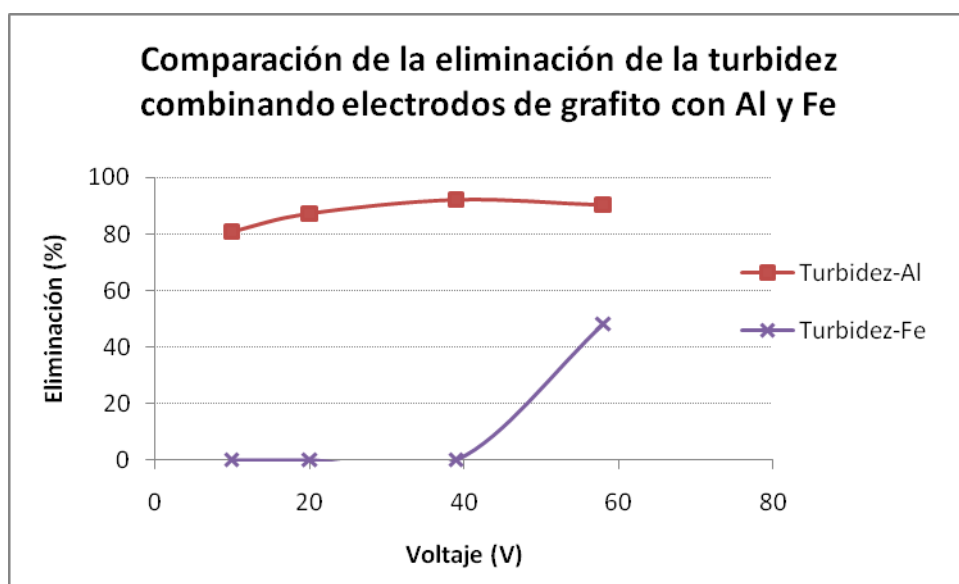


Figura 7.7. Eliminación de turbidez con ánodo de aluminio o hierro y cátodo de grafito, sin placa intermedia

#### Conclusiones:

C-25 Sin placa intermedia, la eliminación de turbidez, con placas de aluminio y grafito, es superior al 80%, en el rango de 10 a 60 V, con un valor óptimo del 92% para 40 V.



C-26 Sin placa intermedia y con placas de hierro y grafito, la turbidez solo alcanzó un rendimiento del 50% para 60 V.

C- 27 Sin placa intermedia, la eliminación de turbidez, con placas de aluminio y grafito, voltaje entre 10 y 60 V, se alcanzó valores medios e la turbidez inferiores a 1 NTU. Según la normativa de reutilización de las aguas según sus usos, el agua obtenida en esta experimentación se considera apta para la reutilización en todos los usos, excepto para uso industrial, calidad 3.2, que fija como límite máximo 1 NTU.

### 7.2.8. Eficacia de la electrocoagulación en la eliminación de DQO. (Objetivo F1.6)

#### Experimentación con placa intermedia

Se ha podido observar que la eficiencia de eliminación de la DQO, trabajando con electrodos de aluminio, con placa intermedia ha variado del 56 al 83% a lo largo de la experimentación. En cambio con electrodos de hierro con placa intermedia la eliminación fue, hasta intensidades superiores a los 7 A, ligeramente menor oscilando entre el 37 al 78%. Véase el siguiente gráfico.

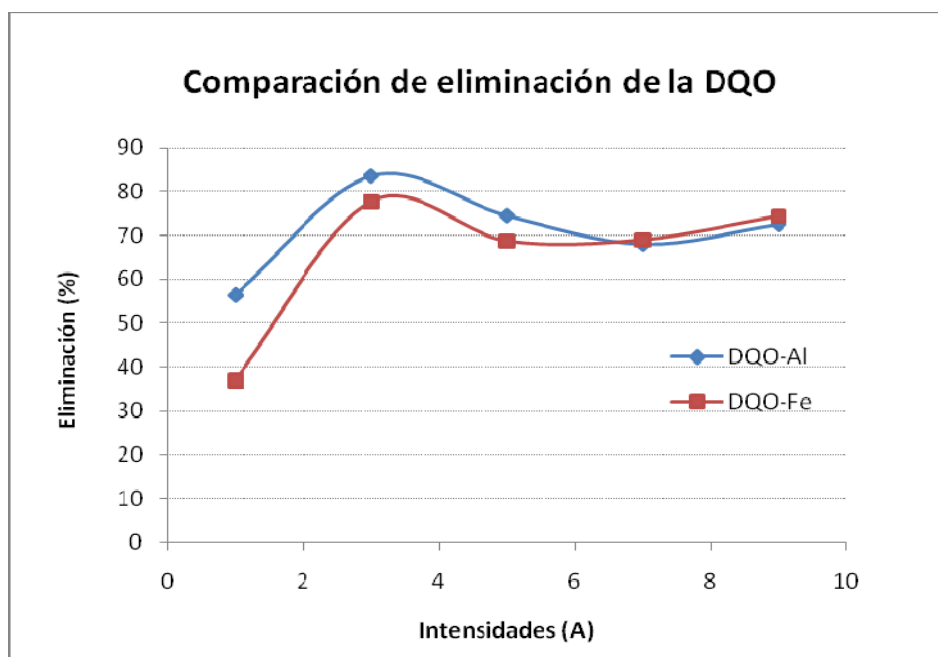


Figura 7.8. Sobre eliminación de la DQO, con electrodos de aluminio o hierro, y placa intermedia

### Conclusiones:

C-28 Con placa intermedia, la eliminación de DQO, con placas de aluminio, ha variado del 56 al 83% a lo largo de la experimentación, entre 1 y 9 A, con un óptimo del 83% para una intensidad de 2,5 A.

C-29 Con placa intermedia y con placas de hierro, la turbidez solo alcanzó la eliminación fue, hasta intensidades superiores a los 7 A, ligeramente menor oscilando entre el 37 al 78%. El máximo obtenido para 9 A.

### Experimentación sin placa intermedia

Cuando se trabajó con aluminio sin placa intermedia, se consiguió un rendimiento parecido trabajando con placa intermedia del 61 al 80%. Y para el caso del hierro sin placa intermedia la eficiencia de eliminación de la DQO aumentó ligeramente del 51 al 82%, respecto a cuando se trabajó con placa intermedia.

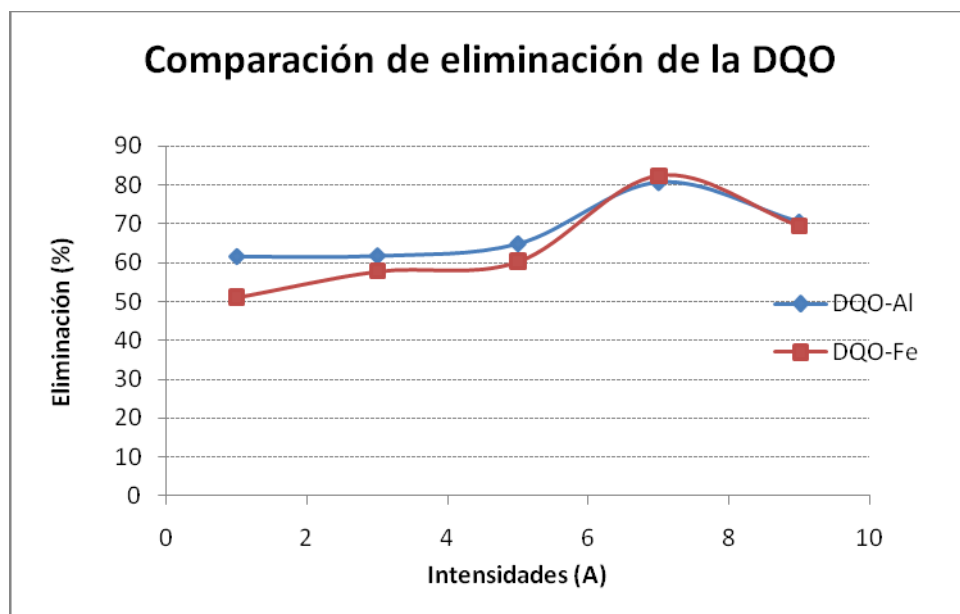


Figura 7.9. Sobre eliminación de la DQO, con electrodos de aluminio o hierro y sin placa intermedia

Conclusiones:

C-30 Sin placa intermedia, la eliminación de DQO, con placas de aluminio, ha variado del 61 al 80% a lo largo de la experimentación, entre 1 y 9 A, con un óptimo del 80% para una intensidad de 7,5 A. Resultados similares a los obtenidos con placas intermedias.

C-31 Sin placa intermedia y con placas de hierro, la turbidez alcanzó una la eliminación del 51 al 82%.El máximo obtenido para 7,5 A. Resultados similares a los obtenidos con placas intermedias.

### **Experimentación con placa de grafito**

Con electrodos de aluminio- grafito, se alcanzó una eficiencia de eliminación de la DQO de 42 – 66%, y con hierro – grafito una eficiencia de 33 a 60%.

Véase el gráfico siguiente.

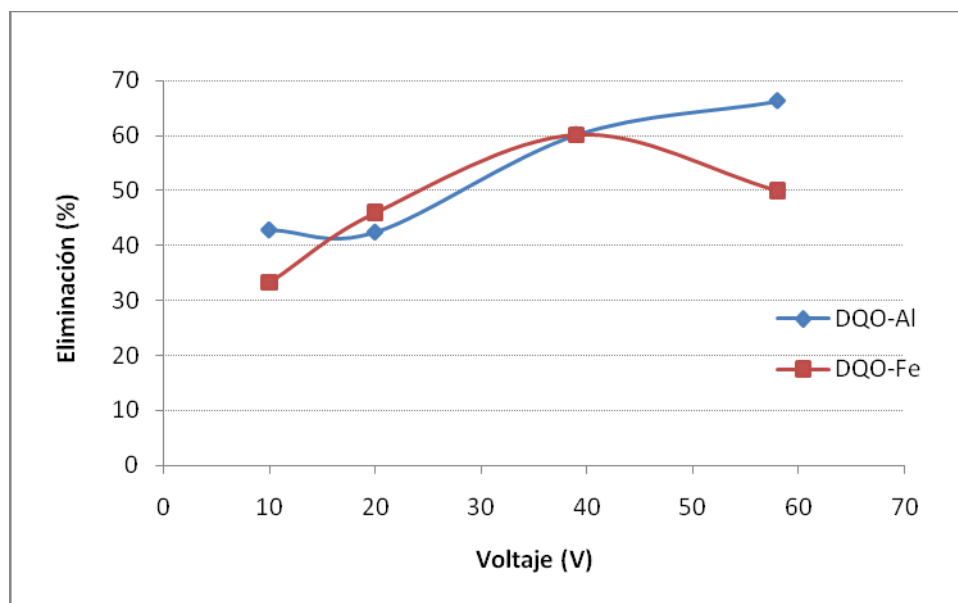


Figura 7.10. Sobre eliminación de la DQO, con ánodo de aluminio o hierro y cátodo de grafito, y sin placa intermedia

Conclusiones:

C-32 Sin placa intermedia, la eliminación de DQO, con ánodo de aluminio y cátodo de grafito, ha variado del 42 – 66%, muy inferior a la reducción con electrodos de aluminio. Los rendimientos mejoran según se elevaba el voltaje de 10 a 60 V.

C-33 Sin placa intermedia y con ánodo de de hierro y cátodo de grafito, la DQO alcanzó una la eliminación del 33 a 60%, muy inferior a la alcanzada con los electrodos de hierro del 51 al 82%.El máximo obtenido para 40 V.

### 7.2.9. Eficacia de la electrocoagulación en la reducción de aniones (nitratos, sulfatos y fosfatos). (Objetivos F1.7 y F2.6)

En los gráficos siguientes, se puede observar un rendimiento prácticamente nulo para menos de 3 minutos de tiempo de retención, y un descenso no significativo hasta los 6 minutos, para voltajes de 3 a 35 V.

En los gráficos siguientes se puede observar un rendimiento nulo, hasta los 6 minutos de tiempo de retención para voltajes de 3 y 12 V. Para 35 V., se observa un descenso del 50%.

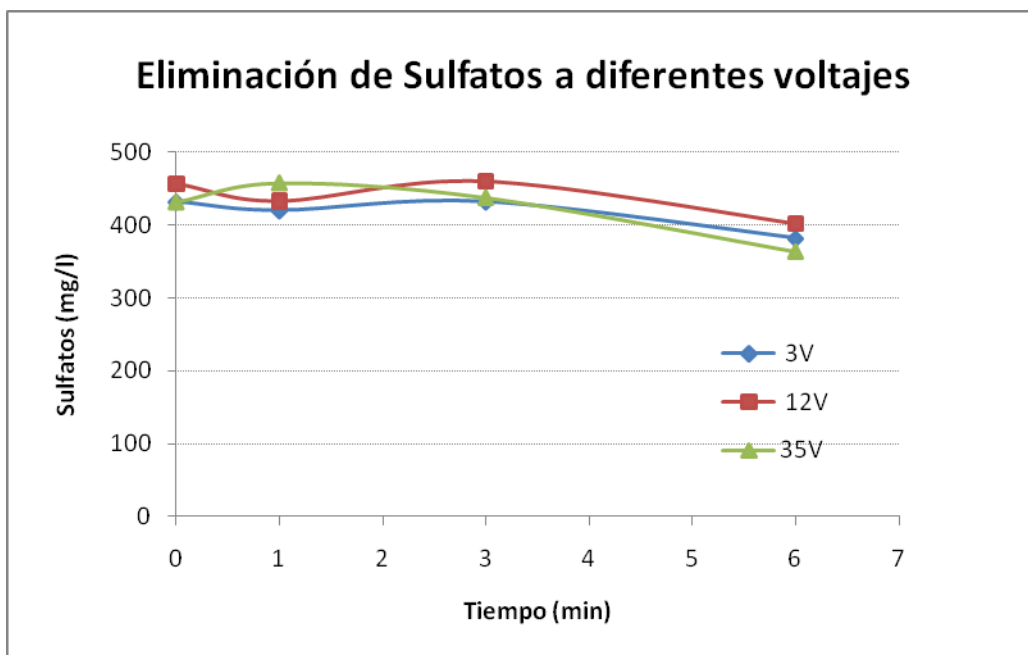


Figura 7.11. Sobre eliminación de sulfatos a distintos voltajes (3, 12, 35 V)

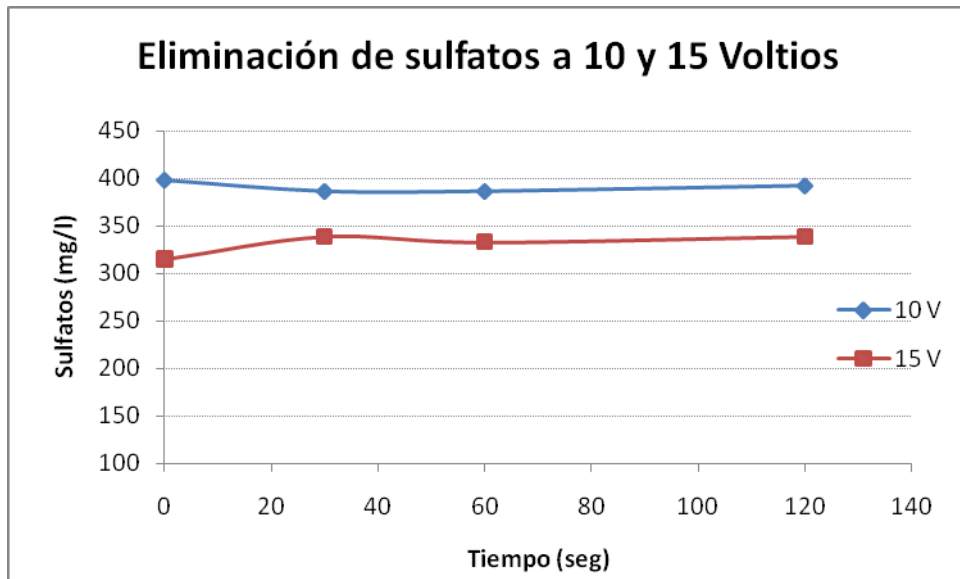


Figura 7.12. Sobre eliminación de sulfatos a distintos voltajes (10, 15 V)

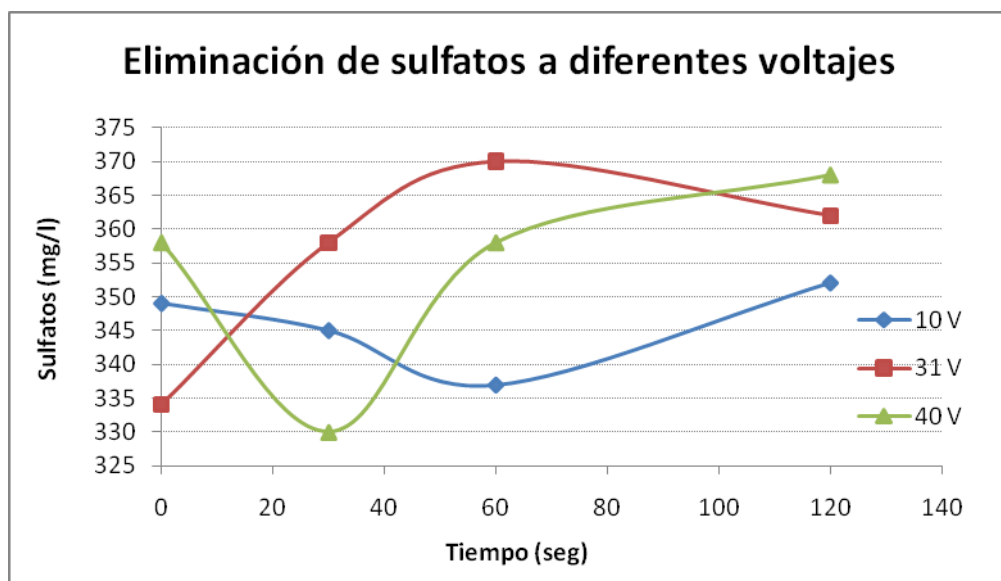


Figura 7.13. Sobre eliminación de sulfatos a distintos voltajes (10, 31, 40 V)

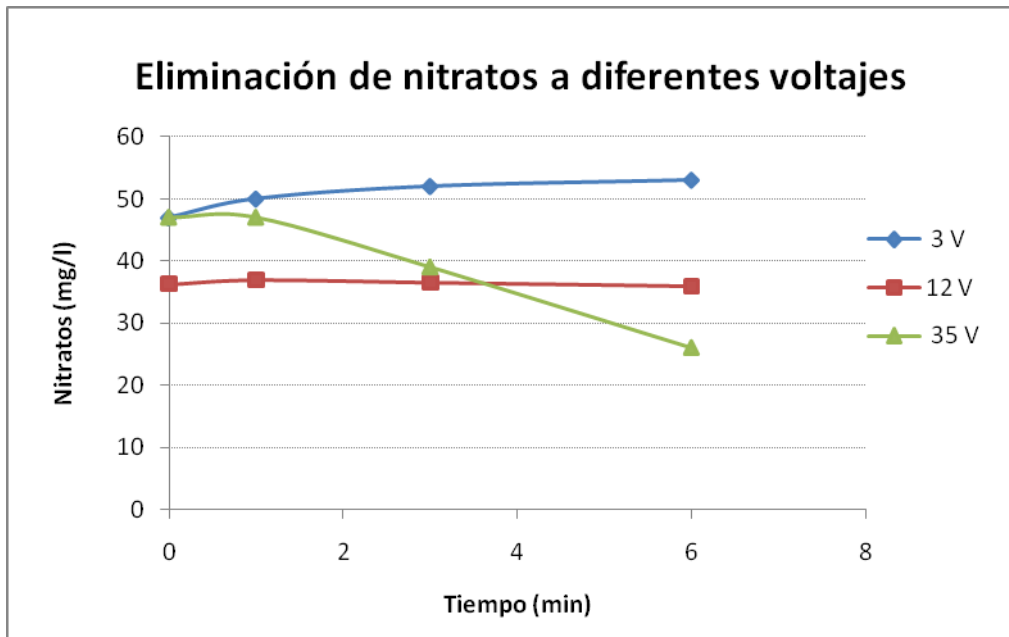


Figura 7.14. Sobre eliminación de nitratos a distintos voltajes (3, 12, 35 V)

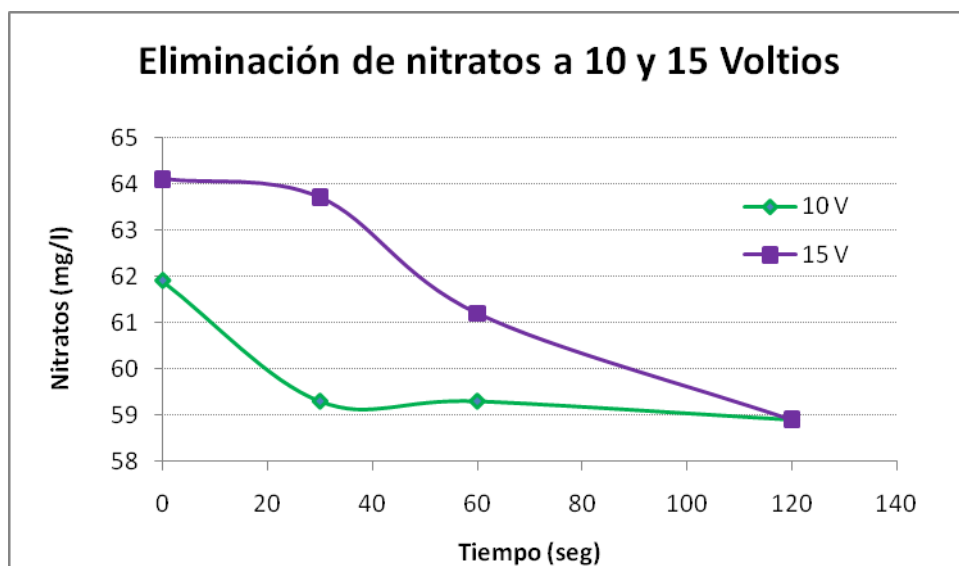


Figura 7.15. Sobre eliminación de nitratos a distintos voltajes (10, 15 V)

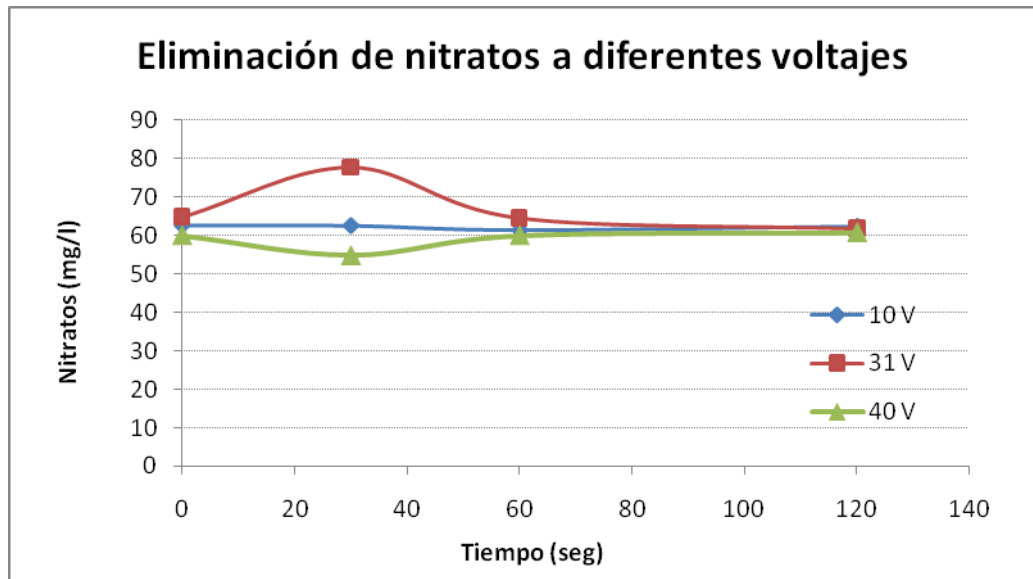


Figura 7.16. Sobre eliminación de nitratos a distintos voltajes (10,31,40 V)

#### Conclusiones:

C-34 Sin placa intermedia, la eliminación de sulfatos es prácticamente nula para menos de 3 minutos de tiempo de retención, y un descenso no significativo hasta los 6 minutos, para voltajes de 3 a 35 V.

C-35 Sin placa intermedia, puede observarse un rendimiento nulo, hasta los 6 minutos de tiempo de retención para voltajes de 3 y 12 V. Para 35 V., se observa un descenso del 50%.

En relación con la eliminación de fosfatos, pueden analizarse los gráficos correspondientes, y gráficos posteriores de las tablas.

Se observa una reducción de fosfatos rápida, en un minuto de tiempo de retención con una diferencia de potencial de 35 V, y no se observa reducción alguna a 12 V, trabajando en batch.

Con 10 y 15 V, se observa un rendimiento del 77%, según el gráfico siguiente, trabajando con caudal circulante. Estos resultados se corroboran con las experiencias del gráfico trabajando con caudal circulante.

En el gráfico siguiente se observa que los rendimientos son prácticamente nulos para tiempos de retención inferiores a los 2,5 minutos.

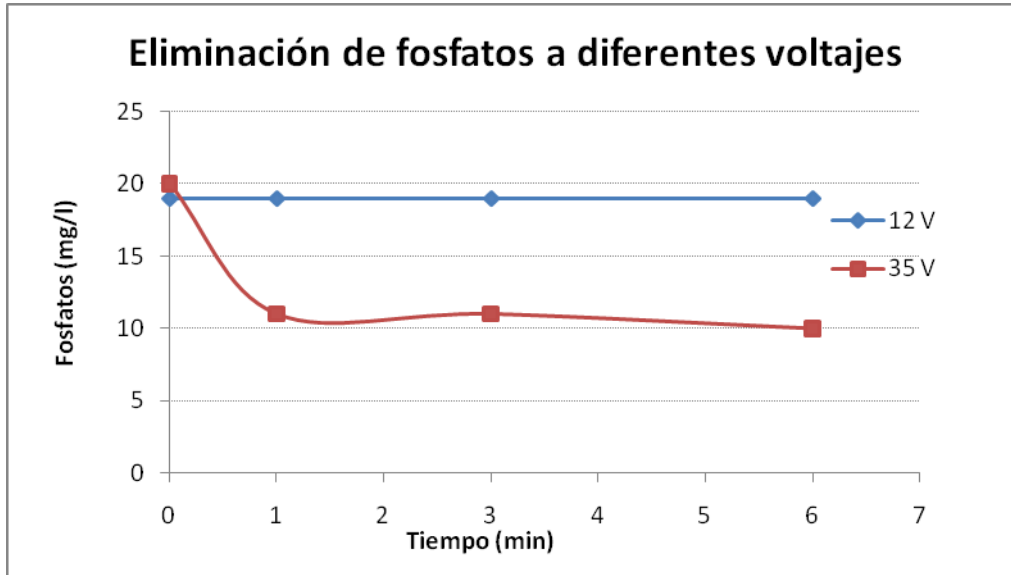


Figura 7.17. Sobre eliminación de fosfatos a distintos voltajes (12, 35 V)

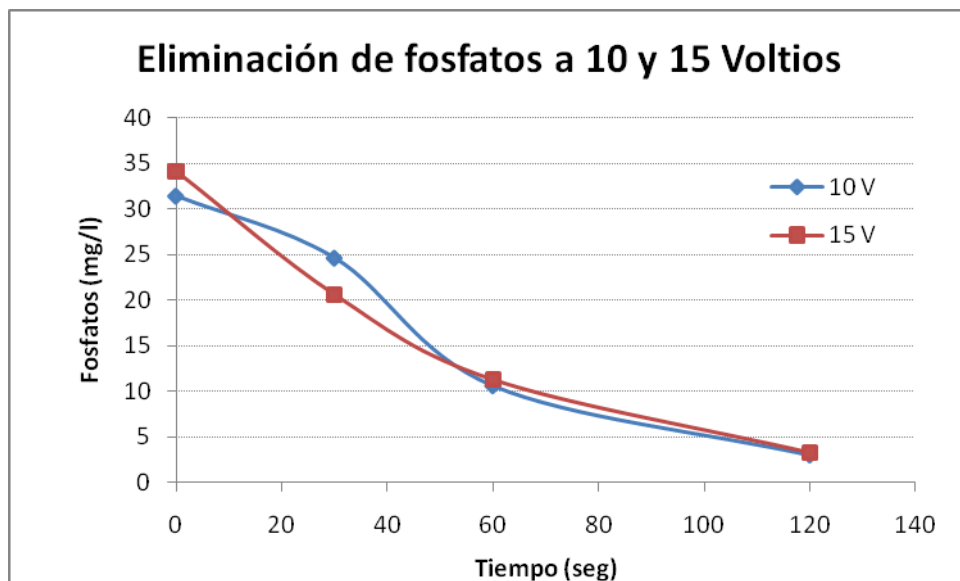


Figura7.18. Sobre eliminación de fosfatos a distintos voltajes (10, 15 V)



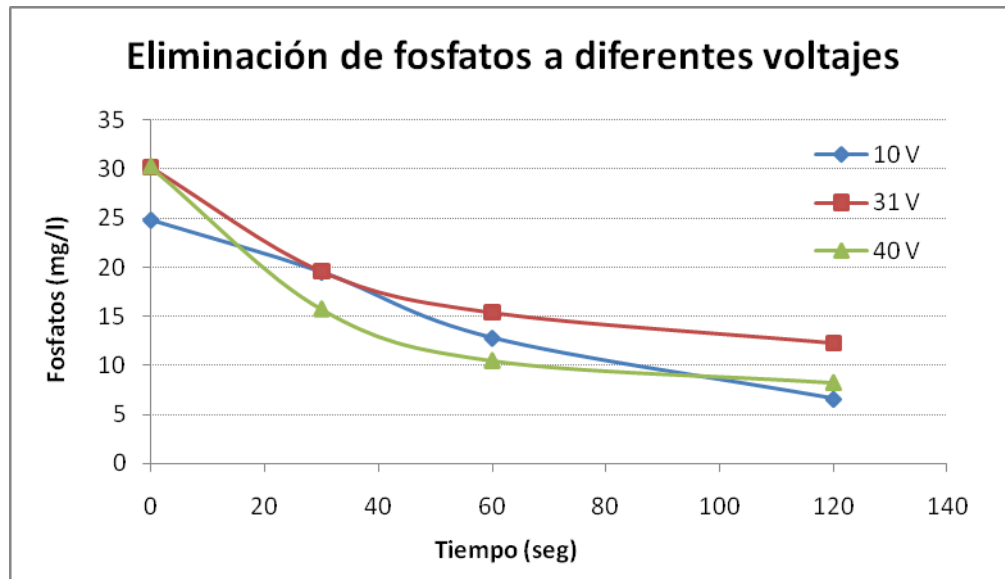


Figura 7.19. Sobre eliminación de nitratos a distintos voltajes (10, 31, 40 V)

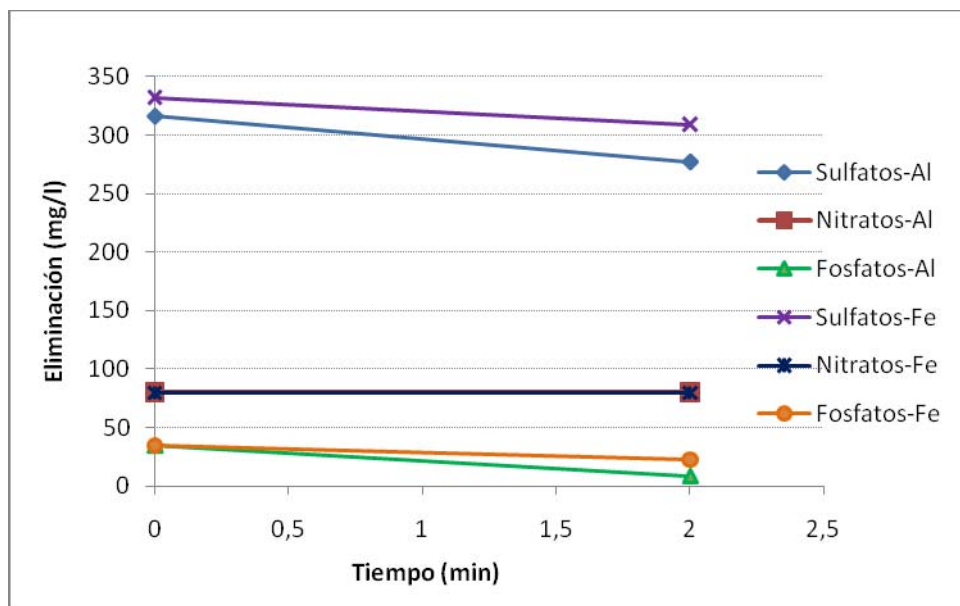


Figura 7.20. Sobre eliminación de sulfatos, nitratos y fosfatos, a distintos tiempos de retención

#### Conclusiones:

C-36 Sin placa intermedia, en batch, la eliminación de fosfatos es prácticamente nula para 12 V, alcanzando rendimientos de hasta el 50% para diferencia de potencial de 35 V.

C-37 Sin placa intermedia, con caudal circulante, puede observarse un rendimiento del 77% para voltajes de 10 y 15 V, en tiempos de retención cortos, de 2 minutos. Se comprueban estos rendimientos para 31 y 40 V, viéndose que no crecen significativamente los rendimientos al incrementarse la diferencia de potencial.

C-38 En sistema batch, la eliminación de sulfatos, nitratos y fosfatos es prácticamente poco significativa para tiempos de retención inferiores a 2,5 minutos. Por el contrario, con caudal en continuo, con electrodos de hierro, separación 2,2 cm, se han obtenido reducción en los fosfatos entre el 59,3% y el 82,4% con diferencia de potencial entre 22 y 40 V. Con electrodos de aluminio, 2,1 cm de separación, los rendimientos obtenidos han variado de forma creciente, del 92,1% al 97,5%, al aumentar el voltaje de 10 a 40 V. Se aumenta un 5,9% de eliminación de fosfatos, al pasar de 10 a 40 V.

#### **7.2.10. Eficacia de la electrocoagulación en la reducción de cationes. (Objetivo F1.8)**

En el gráfico siguiente se muestran los resultados obtenidos mediante electrocoagulación utilizando una celda de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas en la eliminación de metales. Los voltajes han variado entre 10 y 11 V. Se preparó una disolución de agua sintética conteniendo sulfatos de Cr, Cu, Ni, y fosfatos que presentó un pH de 3,6 en el influente. Se observó que según aumentaba el pH de la solución, la eliminación de los metales era mayor. A los 2 minutos de tratamiento los rendimientos obtenidos fueron: para el Cu 99,6 %, para el Cr 91,7 %, para el Ni 69,5 %.

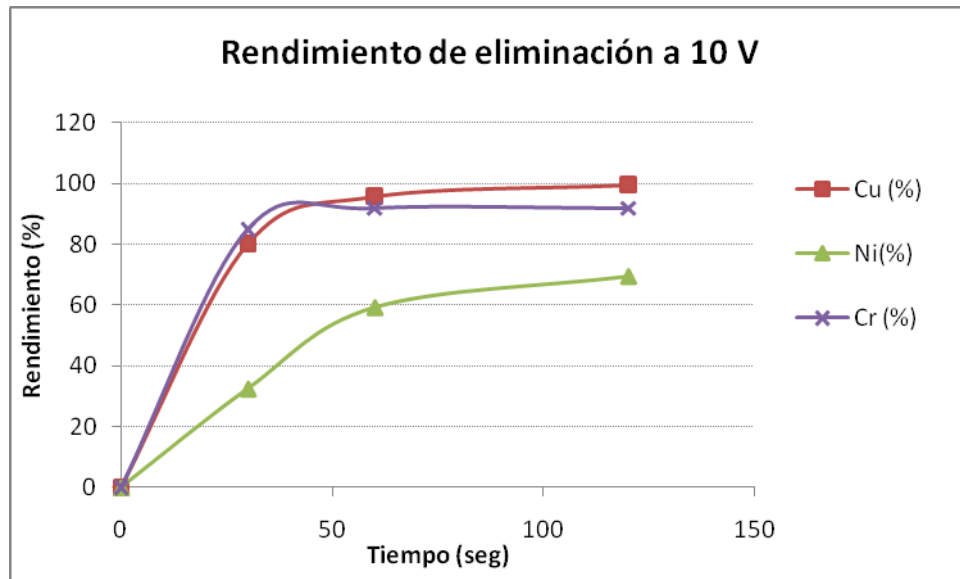


Figura 7.21. Porcentaje de eliminación de metales con electrodos de Al de 3,1 cm de separación entre placas (10 V)

En el gráfico siguiente se muestran los resultados obtenidos mediante electrocoagulación utilizando una celda de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas en la eliminación de metales. El voltaje aplicado fue 15 V. Se observó que según aumentaba el pH de la solución, la eliminación de los metales era mayor. A los 2 minutos de tratamiento los rendimientos obtenidos fueron: para el Cu 99,1 %, para el Cr 92,9 %, para el Ni 99,2 %.

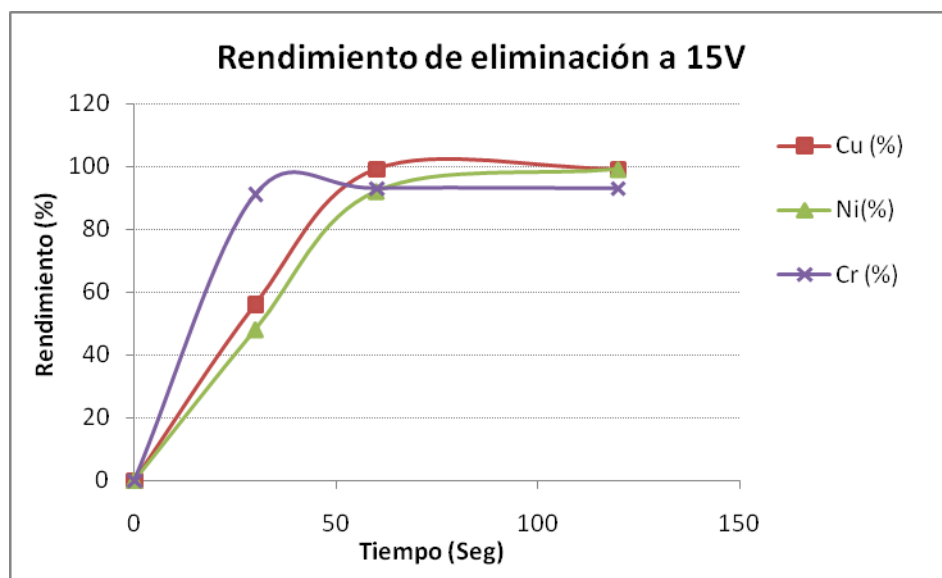


Figura 7.22. Porcentaje de eliminación de metales con electrodos de Al de 3,1 cm de separación entre placas (15 V)

### **Experiencias realizadas con celda de hierro, de 2,2 cm de separación entre placas**

En el gráfico siguiente se muestran los resultados obtenidos mediante electrocoagulación utilizando una celda de hierro en la eliminación de metales. El voltaje aplicado fue de 10 V. El agua sintética utilizada fue el mismo para toda la experimentación. Como se mencionó anteriormente, se observó que, según aumentaba el pH de la solución, la eliminación de los metales era mayor. Los rendimientos obtenidos a los 2 minutos de tratamiento fueron: para el Cu 97,4 %, para el Cr 96,4 %, para el Ni 89,8 %, para el Zn 98,1 %, y del 73,4% para el fósforo.

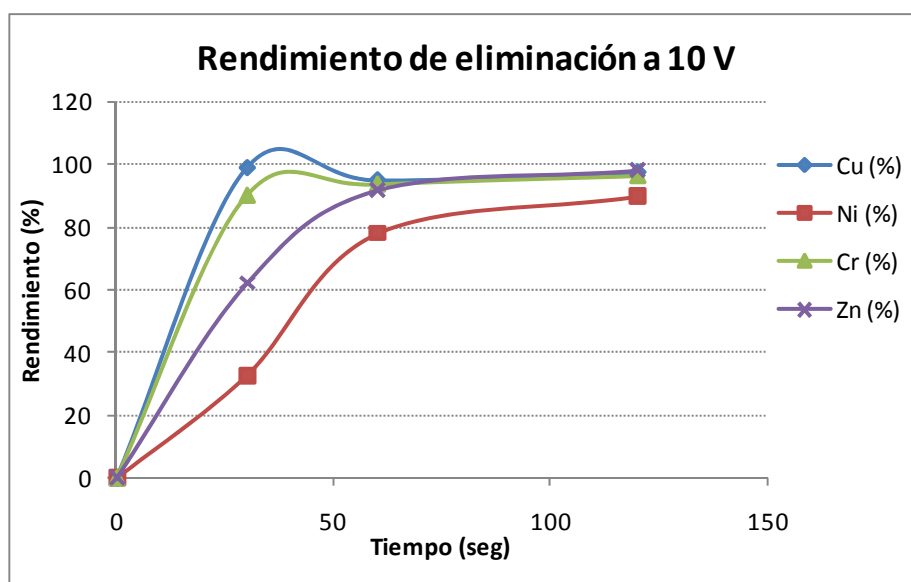


Figura 7.23. Porcentaje de eliminación de metales con electrodos de Fe de 2,2 cm de separación entre placas (10 V)

En el gráfico siguiente se muestran los resultados obtenidos mediante electrocoagulación utilizando una celda de hierro en la eliminación de metales. El voltaje aplicado fue de 23 V. El agua sintética utilizada fue la misma para toda la experimentación. El pH, conductividad y temperatura, se midieron en el interior de la celda, observándose la existencia de óxido en las placas. Como se mencionó anteriormente, se observó que según aumentaba el pH de la solución, la eliminación de los metales era mayor. Al minuto de tratamiento la eliminación del cobre y cromo fue casi completa, al parecer posteriormente se produce una nueva pequeña disolución, motivo por el cual aumentan su concentración al cabo de los 2 minutos de tratamiento, con el Ni y el Zn no se observó tal comportamiento. Los rendimientos obtenidos a los 2 minutos fueron: para el Cu 94,6 %, para el Cr 95,3 %, para el Ni 85,1 %, para el Zn 78,2 %, y 82,4% para el P.

Tiempo seg	Voltaje V	Temp. °C	pH	Conduct. $\mu\text{S/cm}$	$\text{PO}_4^{3-}$ mg/l	Cu $\mu\text{g/l}$	Ni $\mu\text{g/l}$	Cr $\mu\text{g/l}$	Zn $\mu\text{g/l}$
0	22	21.1	5.27	1430	45,5	4260	828	43	1560
30	23	22.0	5.52	1442	16,0	381	718	0,0	1300
60	23	23.2	6.40	1461	8,0	28	283	0,7	550
120	23	24.5	8.91	1492	8,0	228	123	2,0	340

Tabla 7.6. Resultados del agua tratada con reactor de hierro, 2,2 cm de separación entre placas (23V)

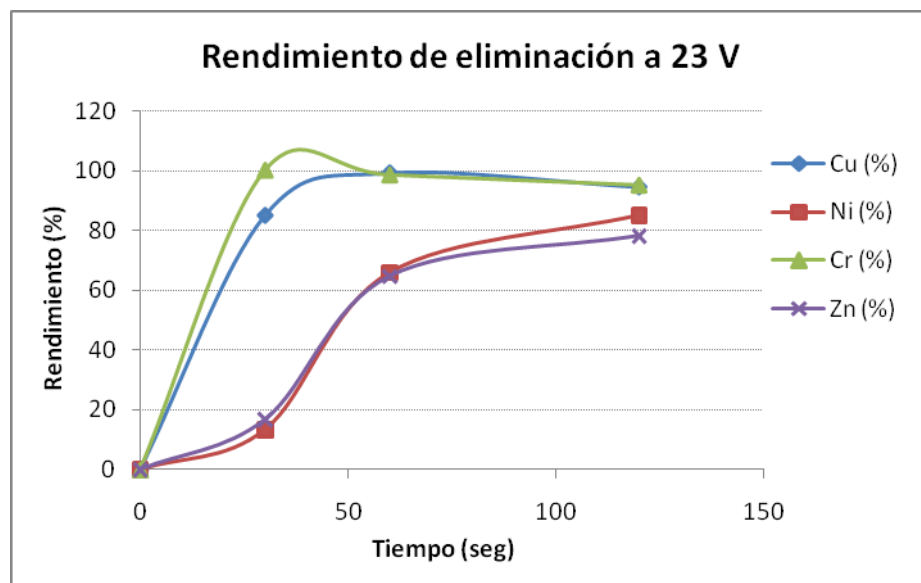


Figura 7.24. Porcentaje de eliminación de metales con electrodos de Fe de 2,2 cm de separación entre placas (23 V)

En el gráfico siguiente se muestran los resultados obtenidos mediante electrocoagulación utilizando una celda de hierro en la eliminación de metales. El voltaje aplicado fue de 31 V. Al minuto de tratamiento la eliminación del cobre y cromo fue cercana al 99 %, mientras que al cabo de los dos minutos aumenta la concentración del cobre. Los rendimientos obtenidos a los 2 minutos fueron: para el Cu 94,3 %, para el Cr 97,6 %, para el Ni 91,2 %, para el Zn 97,5 %, y 59,3% para el fósforo.

Tiempo seg	Voltaje V	Temp. °C	pH	Conduct $\mu\text{S/cm}$	$\text{PO}_4^{-3}$ mg/l	Cu $\mu\text{g/l}$	Ni $\mu\text{g/l}$	Cr $\mu\text{g/l}$	Zn $\mu\text{g/l}$
0	31	20.1	5.12	665	30,2	3851	1220	82	1580
30	31	21.6	5.40	592	19,6	1043	617	13	1230
60	31	22.8	5.56	536	15,4	39	340	1	370
120	31	24.5	6.40	507	12,3	218	107	2	40

Tabla 7.7. Resultados del agua tratada con reactor de hierro, 2,2 cm de separación entre placas (31 V)

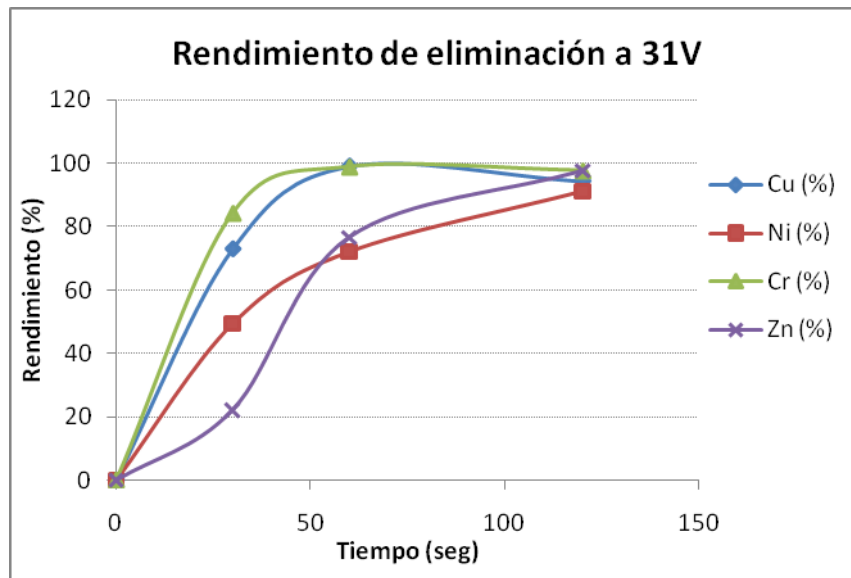


Figura 7.25. Porcentaje de eliminación de metales con electrodos de hierro de 2,2 cm de separación entre placas (31 V)

Tiempo seg	Voltaje V	Temp. °C	pH	Conduct. $\mu\text{S/cm}$	$\text{PO}_4^{-3}$ mg/l	Cu $\mu\text{g/l}$	Ni $\mu\text{g/l}$	Cr $\mu\text{g/l}$	Zn $\mu\text{g/l}$
0	40	20.3	4.73	640	30,25	3953	953	66	1600
30	40	22.4	5.30	545	15,75	116	791	0,3	720
60	40	24.0	5.80	480	10,50	195	450	0,1	700
120	40	26.0	6.82	450	8,25	374	104	0,8	530

Tabla 7.8. Resultados del agua tratada con reactor de hierro, 2,2 cm de separación entre placas (40 V)

En el gráfico siguiente se muestran los resultados obtenidos mediante electrocoagulación utilizando una celda de hierro en la eliminación de metales. El voltaje aplicado fue de 40 V. El

mejor rendimiento para el cobre y cromo se observó a los 30 segundos. Los rendimientos obtenidos a los 2 minutos fueron: para el Cu 90,5%, para el Cr 98,8%, para el Ni 89,1%, para el Zn 96,9%, y 72,7 para el fósforo.

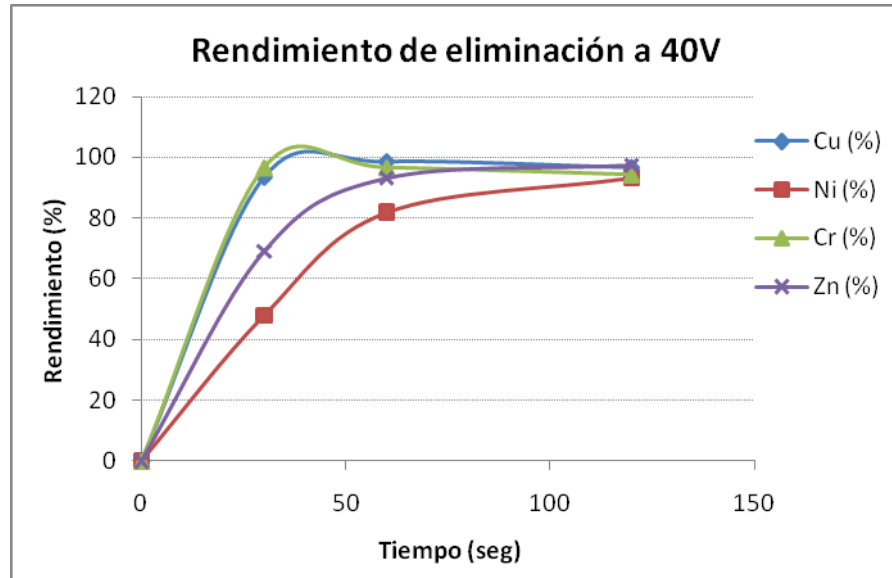


Figura 7.26. Porcentaje de eliminación de metales con electrodos de hierro de 2,2 cm de separación entre placas (40 V)

#### **Experiencias realizadas con celda de aluminio, de 2,1 cm de separación entre placas**

En el gráfico siguiente se muestran los resultados obtenidos mediante electrocoagulación, utilizando una celda de aluminio de 2,1 cm de separación entre placas, en la eliminación de metales. El voltaje aplicado fue de 10 V. Los rendimientos obtenidos a los 2 minutos fueron: para el Cu 97,9 %, para el Cr 100 %, para el Ni 97 %, para el Zn 100 %, y 92,1 para el P.

Tiempo seg	Voltaje V	Temp. °C	pH	Conduct. $\mu\text{S}/\text{cm}$	$\text{PO}_4^{-3}$ mg/l	Cu $\mu\text{g}/\text{l}$	Ni $\mu\text{g}/\text{l}$	Cr $\mu\text{g}/\text{l}$	Zn $\mu\text{g}/\text{l}$
0	10	21,3	4,31	1490	23,9	5108	1467	163,3	1653
30	10	21,5	5.29	1450	22,3	2194	1351	28,7	1184
60	10	21,7	6.69	1446	11,8	99,2	751	1,7	36
120	10	22.5	8.51	1427	1,9	105	44,7	0	0

Tabla 7.9. Resultados del agua tratada con electrodos de Al de 2,1 cm de separación entre placas (10 V)

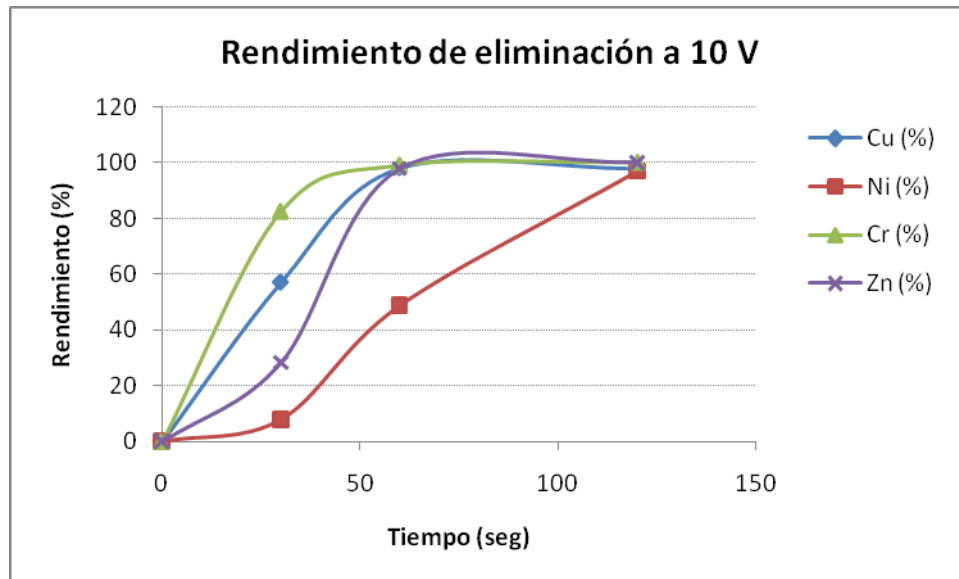


Figura 7.27. Porcentaje de eliminación de metales con electrodos de Al de 2,1 cm de separación entre placas (10 V)

En el gráfico siguiente se muestran los resultados obtenidos mediante electrocoagulación utilizando una celda de aluminio de 2,1 cm de separación entre placas en la eliminación de metales. El voltaje aplicado fue de 23 V. Los rendimientos obtenidos a los 2 minutos fueron: para el Cu 98,3%, para el Cr 100 %, para el Ni 96,8 %, para el Zn 100 %, y 95% para el P.

Tiempo seg	Voltaje V	Temp. °C	pH	Conduct. $\mu\text{S}/\text{cm}$	$\text{PO}_4^{-3}$ mg/l	Cu $\mu\text{g}/\text{l}$	Ni $\mu\text{g}/\text{l}$	Cr $\mu\text{g}/\text{l}$	Zn $\mu\text{g}/\text{l}$
0	23	19,9	3,70	1490	23,9	5108	1467	163	1653
30	23	20,9	6,20	1435	17,1	230	1040	16,7	157
60	23	21,9	8,20	1423	6,0	76,7	80,7	9,3	2,8
120	23	23,8	8.81	1419	1,2	84,6	47,3	0	0

Tabla 7.10. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio, 2,1 cm de separación entre placas (23 V)



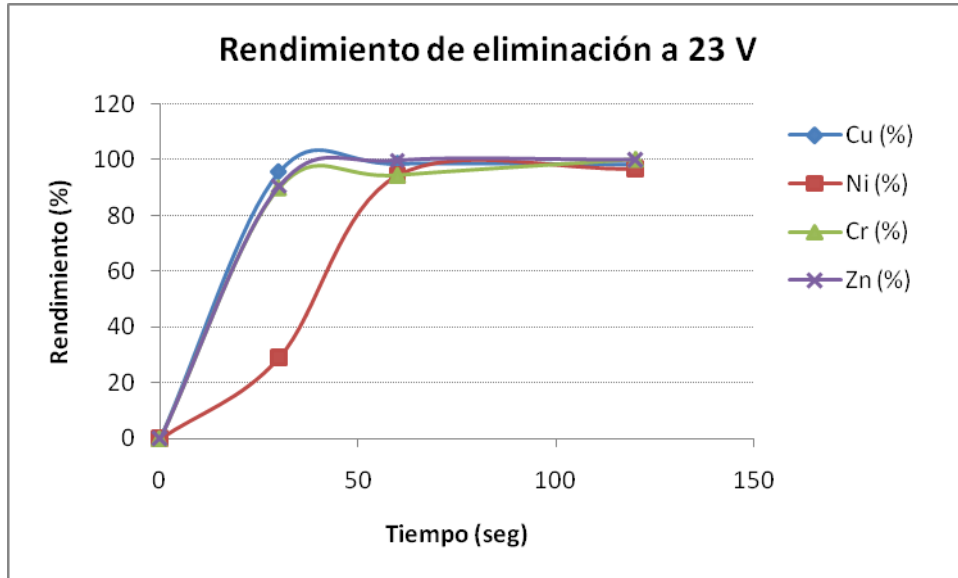


Figura 7.28. Porcentaje de eliminación de metales con electrodos de Al de 2,1 cm de separación entre placas (23 V)

En el gráfico siguiente se muestran los resultados obtenidos mediante electrocoagulación utilizando una celda de aluminio de 2,1 cm de separación entre placas en la eliminación de metales. El voltaje aplicado fue de 31 V. Los rendimientos obtenidos a los 2 minutos fueron: para el Cu 99,1%, para el Cr se observa que se alcanza el 100%, pero a los 2 minutos se vuelve a incrementar la concentración del cromo, lo que indica una redisolución del metal, siendo la eliminación a los 2 minutos de un 93,5 %, para el Ni 95,9 %, para el Zn 99,5 %, y del 96,7% para el P.

Tiempo seg	Voltaje V	Temp. °C	pH	Conduc $\mu\text{S}/\text{cm}$	$\text{PO}_4^{-3}$ mg/l	Cu $\mu\text{g}/\text{l}$	Ni $\mu\text{g}/\text{l}$	Cr $\mu\text{g}/\text{l}$	Zn $\mu\text{g}/\text{l}$
0	31	20,7	3,68	1444	24,4	5033	1067	383	1661
30	31	22,0	7,81	1392	16,9	142	76,7	3,0	7,5
60	31	23,0	8,73	1396	5,6	92,5	34,7	0	3,6
120	31	25,8	8,82	1396	0,8	45,4	43,3	24,7	8,5

Tabla 7.11. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 2,1 cm de separación entre placas (31 V)

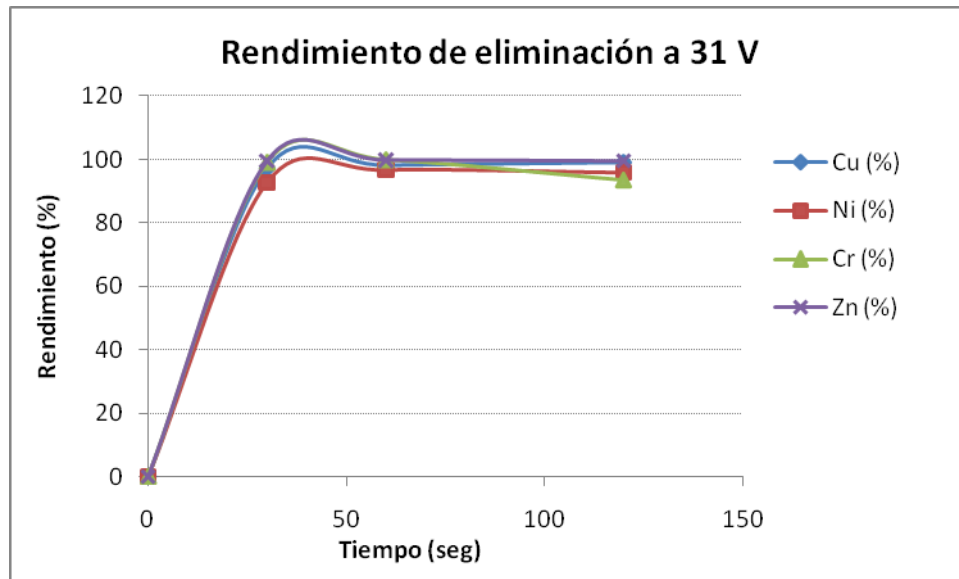


Figura 7.29. Porcentaje de eliminación de metales con electrodos de Al de 2,1 cm de separación entre placas (31 V)

En el gráfico siguiente se muestran los resultados obtenidos mediante electrocoagulación utilizando una celda de aluminio de 2,1 cm de separación entre placas en la eliminación de metales. El voltaje aplicado fue de 40 V. Los rendimientos obtenidos a los 2 minutos fueron: para el Cu 98,8 %, para el Cr 98,4 %, para el Ni 93,2 %, para el Zn 98,7 %, y 97.5% para el P.

Tiempo seg	Voltaje V	Temp. °C	pH	Conduct. $\mu\text{S/cm}$	$\text{PO}_4^{-3}$ mg/l	Cu $\mu\text{g/l}$	Ni $\mu\text{g/l}$	Cr $\mu\text{g/l}$	Zn $\mu\text{g/l}$
0	40	20,7	3,68	1440	24,4	5033	1067	383	1661
30	40	23,8	7,94	1397	11,5	84,2	115,3	3,7	35,0
60	40	26,0	8,89	1392	3,8	67,5	52,7	0	6,2
120	40	29,4	8,96	1395	0,6	58,8	72,7	6,0	21,7

Tabla 7.12. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio, 2,1 cm de separación entre placas (40 V)

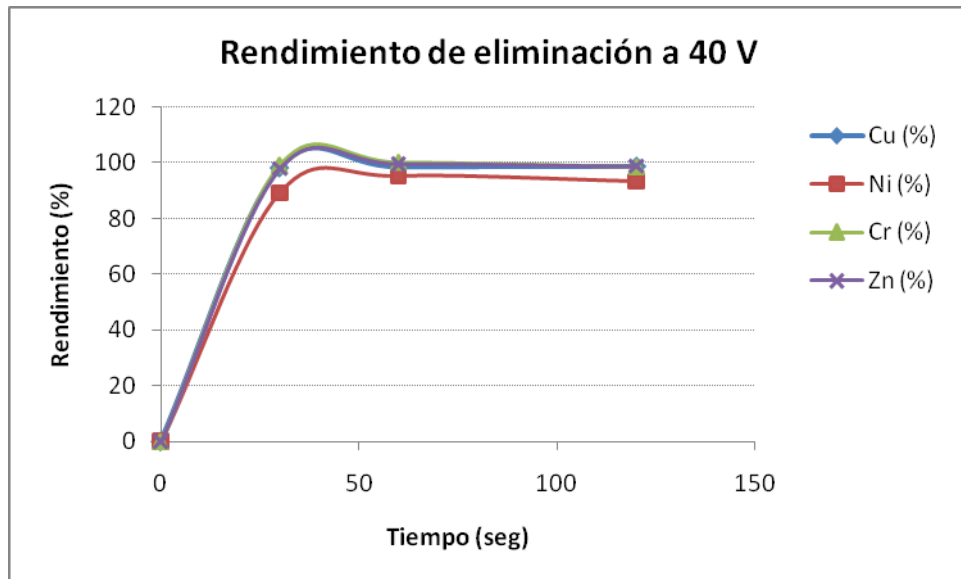


Figura 7.30. Porcentaje de eliminación de metales con electrodos de Al de 2,1 cm de separación entre placas (40 V)

Pueden agruparse los datos anteriores en la siguiente tabla.

Diferencia de potencial v. En eliminación de metales	Separación 2,1 cm Placas Al		Separación 2,2 cm Placas Fe		Separación 3,1 cm Placas Al	
	Rendimiento %	Tiempo seg	Rendimiento %	Tiempo seg	Rendimiento %	Tiempo Seg
10					98-99,6	60-120
Cu						
Ni					60-69,5	60-120
Cr					91,7	51-120
Zn						
15					99,1	60-120
Cu						
Ni					99,2	70-120
Cr					92,9	40-120
Zn						
10			97,4	30-120		
Cu						
Ni			80-89,8	60-120		
Cr			96,4	30-120		
Zn			98,1	30-120		
23			94,6	40-120		
Cu						
Ni			65-85,1	60-120		
Cr			99-95,3	40-120		
Zn			65-78,2	60-120		

Tabla 7.13. Rendimientos en la eliminación de metales, atendiendo al voltaje y separación de placas

Diferencia de potencial v. En eliminación de metales	Separación 2,1 cm		Separación 2,2 cm		Separación 3,1 cm	
	Placas Al		Placas Fe		Placas Al	
	Rendimiento %	Tiempo seg	Rendimiento %	Tiempo seg	Rendimiento %	Tiempo Seg
31						
Cu			94,3	60-120		
Ni			72-91,2	60-120		
Cr			97,6	50-120		
Zn			75-97,5	60-120		
40						
Cu			90,5	40-120		
Ni			82-89.1	60-120		
Cr			98,8	40-120		
Zn			91-96,9	60-120		
10						
Cu	97,9	60-120				
Ni	50-97	60-120				
Cr	100	50-120				
Zn	100	60-120				
23						
Cu	98,3	30-120				
Ni	92-96,8	60-120				
Cr	100	40-120				
Zn	100	40-120				
31						
Cu	99,1	40-120				
Ni	92-95,9	40-120				
Cr	100-93,5	40-120				
Zn	99,5	40-120				
40						
Cu	98,8	40-120				
Ni	90-93,2	40-120				
Cr	98,4	40-120				
Zn	98,7	40-120				

Tabla 7.13. Continuación. Rendimientos en la eliminación de metales, atendiendo al voltaje y separación de placas

#### Conclusiones:

C-39 Sin placa intermedia, con placas de aluminio, la eliminación de metales se considera óptima la separación de 2,1 cm, ya que, casi con los mismos resultados, con separación de 3,1 cm se necesitaría incrementar la diferencia de potencial a 15 V. Los rendimientos en la eliminación son del: 97,9% para el cobre, 97% para el cromo, y del 100% para el níquel y el zinc.

C-40 Sin placa intermedia, con placas de hierro, con diferencia de potencial de 10 V, los rendimientos de eliminación son del: 97,4 para el cobre, 89,8% para el níquel, 96,4% para el cromo, 98,1% para el zinc. Siendo el tiempo de retención de 120 segundos.

C-41 La eliminación de metales, con diferencia de potencial de 10V, es más eficaz con placas de aluminio como electrodos.

### **7.2.11. Eficacia de la electrocoagulación sobre las aguas prepotables. (Objetivo F1.9)**

#### **Resultados más relevantes utilizando agua del río Manzanares y celda de aluminio de 1,4 cm de separación entre placas.**

El gráfico siguiente muestra los rendimientos obtenidos con agua del río Manzanares, mediante el tratamiento por electrocoagulación con celda de aluminio de 1,4 cm de separación entre placas a 10 V, el agua del electrocoagulador era de color blanquecino, al comienzo no se observaban los flóculos, pero conforme pasaba el tiempo se iban aglomerando y decantando. A los 30 min de decantación los flóculos aún no habían llegado a compactarse, siendo el precipitado de color crema. Como puede observarse, los mejores resultados se obtienen a los 6 minutos de tiempo de retención en la electrólisis, alcanzando un 89% de eliminación de SS, un 95% de turbidez, y un 22% de eliminación de la DQO.

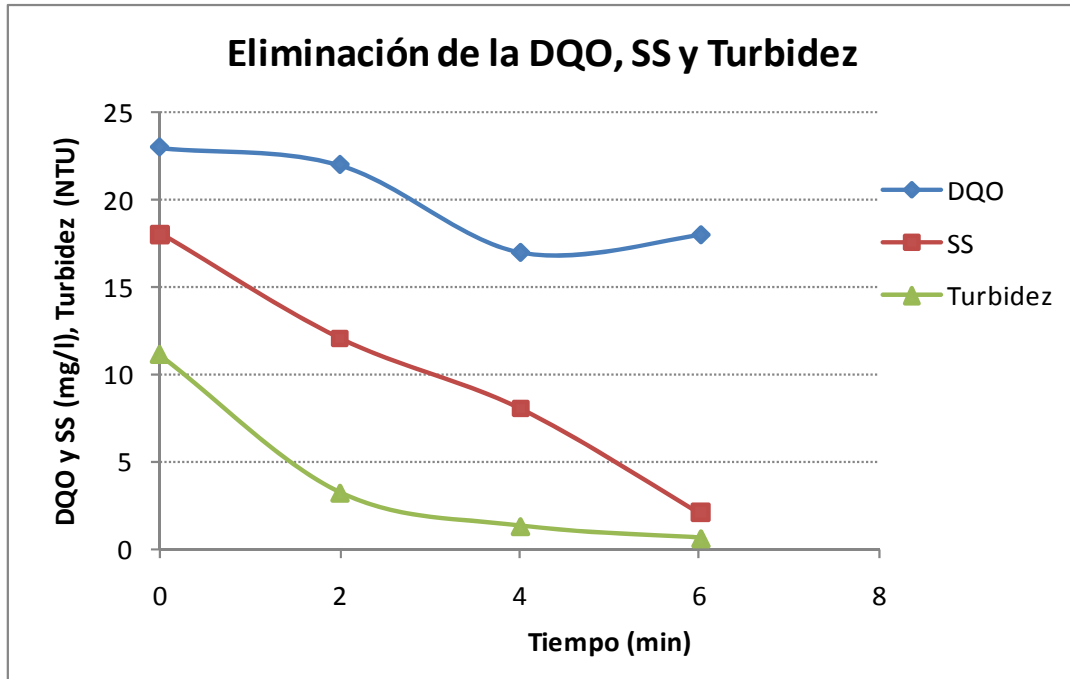


Figura 7.31. Eliminación de la DQO, SS, Turbidez con electrodos de Aluminio a 10 V

En el gráfico siguiente se muestran los resultados obtenidos con agua del río Manzanares antes y después del tratamiento por electrocoagulación con celda de aluminio a 15 V. A los 2 minutos de tiempo de retención en la electrólisis habían pocos flóculos y muy ligeros, que a los 30 min de decantación no llegaron a compactarse. Para los tiempos de electrólisis de 4 y 6 minutos el clarificado era muy bueno, pero los flóculos eran muy esponjosos.

Los mejores resultados se obtienen a los 6 minutos de electrólisis, alcanzando un 89% de eliminación de SS, un 94% de turbidez, y un 74% de eliminación de la DQO.

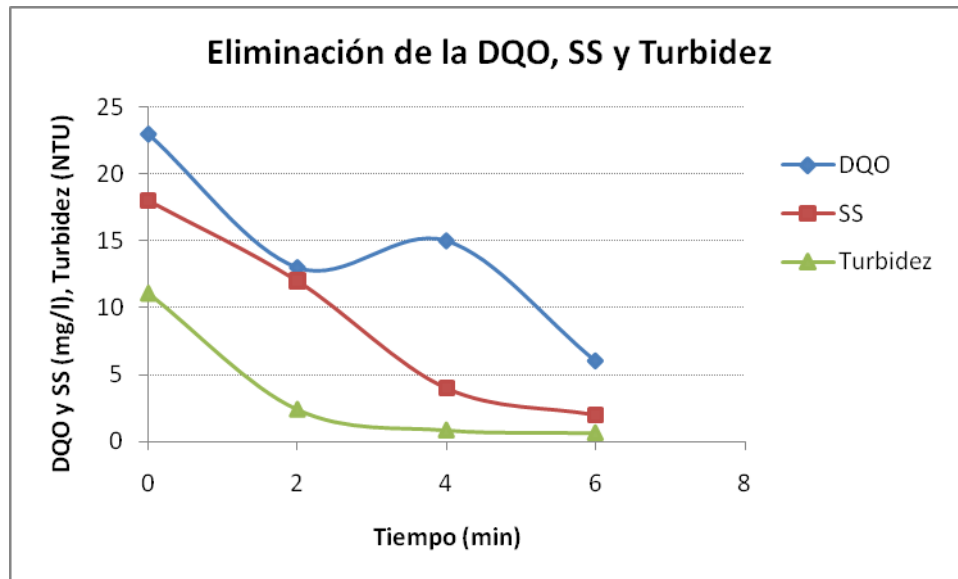


Figura 7.32. Eliminación de la DQO, SS, Turbidez con electrodos de Aluminio a 15 V

**Resultados más relevantes utilizando agua del río Manzanares y celda de aluminio de 2,1 cm de separación entre placas.**

En el gráfico siguiente se muestran los resultados obtenidos con agua del río antes y después del tratamiento por electrocoagulación con celdas de aluminio de 2,1 cm de separación entre placas, diferencia de potencial de 10 V. El agua del electrocoagulador era de color blanquecino a los 2 minutos de tiempo de electrólisis, a los 30 min de la fase de decantación se observó que había flóculos finos en el sobrenadante, que se unían y ascendían a la superficie, motivo por el cual no se han realizado análisis ya que los resultados serían erróneos. Para los tiempos de electrólisis de 4 y 6 minutos también los flóculos han ascendido, pero el sobrenadante era más limpio. Mientras que a los 10 minutos los flóculos llegaron a sedimentar pero no se compactaban. Los mejores resultados se obtuvieron con 10 minutos de tiempo de retención en la electrolisis, lo que nos dio un rendimiento del 92 % para la turbidez, 60 % para los SS, y 65 % para la DQO.

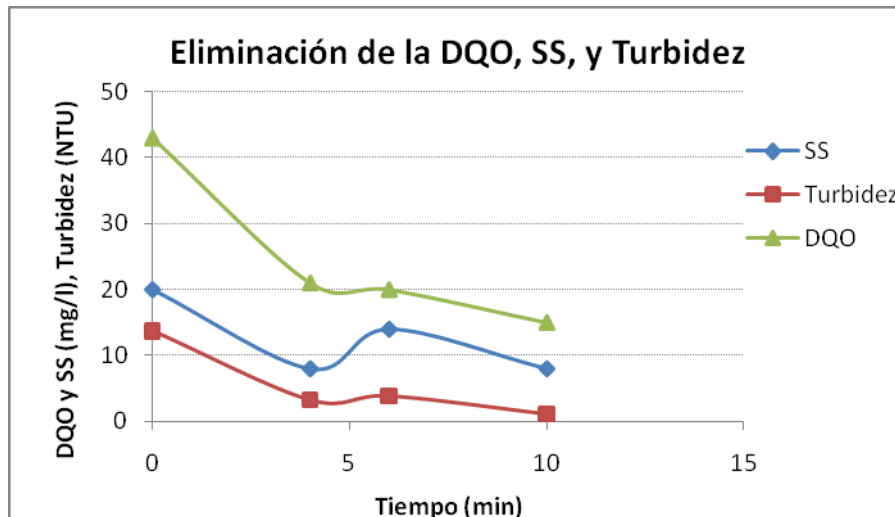


Figura 7.33. Eliminación de la DQO, SS, Turbidez con electrodos de Al a 10 V

Conclusiones:

C-42 Se consiguen unos rendimientos del 95%, en la reducción de la turbidez, con separación de placas de 1,4 cm, diferencia de potencial de 10 V.

C-43 A igual separación se obtienen unos resultados más importantes para la eliminación de SS y DQO, elevando la diferencia de potencial a 15 V. Los rendimientos alcanzados son: 89% en SS, 94% en turbidez y 74% en DQO.

C-44 Rendimientos similares a los anteriores se consiguen elevando la separación a 2,1 cm, con diferencia de potencial de 10 V. Los rendimientos alcanzados en este caso son: 60% en SS, 92% en turbidez y 65% en DQO.

### 7.3. Resultados obtenidos de la 2ª Fase

#### 7.3.1. En relación con el grado de cumplimiento de los sistemas de electrocoagulación con las normativas actuales de reutilización, referentes a los parámetros fisicoquímicos como son: SS, DQO y turbidez. (Objetivos F1.10 y F2.9)

En esta segunda fase los trabajos experimentales se realizaron con aportación de caudales constantes, en continuo, a las cámaras de electrocoagulación.



A continuación se presentan los resultados obtenidos con aguas procedentes de los decantadores secundario y primario de la depuradora de Villalba. Utilizando una celda de aluminio de 1,4 cm de separación entre placas y una celda de hierro de 2,2 cm de separación entre placas.

En la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos al tratar agua del decantador secundario con el sistema de electrocoagulación, a 20 V y 4,09 A, utilizando celda de aluminio de 1,4 cm de separación entre placas.

Se obtienen buenos resultados en la reducción de la turbidez y SS. En relación a la DQO, se observa que comienza a bajar y luego aumenta como se puede observar en el gráfico siguiente. Esto puede explicarse debido a que al ir aumentando el pH se solubilizan sustancias. Lo mismo ocurre con el aumento de la temperatura, formándose compuestos solubles que no son eliminados. Según la bibliografía con electrodos de aluminio se tienen buenos resultados en la eliminación de la DQO a pH ácido, mayor que 4.

Tiempo min	Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conduct. $\mu\text{S}/\text{cm}$	SS mg/l	Turb. NTU	DQO mg/l
0			22,0	7,32	800	6	1,76	82
2	20	4,09	25,2	7,93	766	4	0,89	70
4	20	4,09	26,2	8,37	726	0	0,33	46
6	20	4,09	28,3	8,61	688	0	0,22	86
10	20	4,00	32,6	8,80	643	0	0,26	80

Tabla 7.14. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 1,4 cm de separación entre placas (20 V)

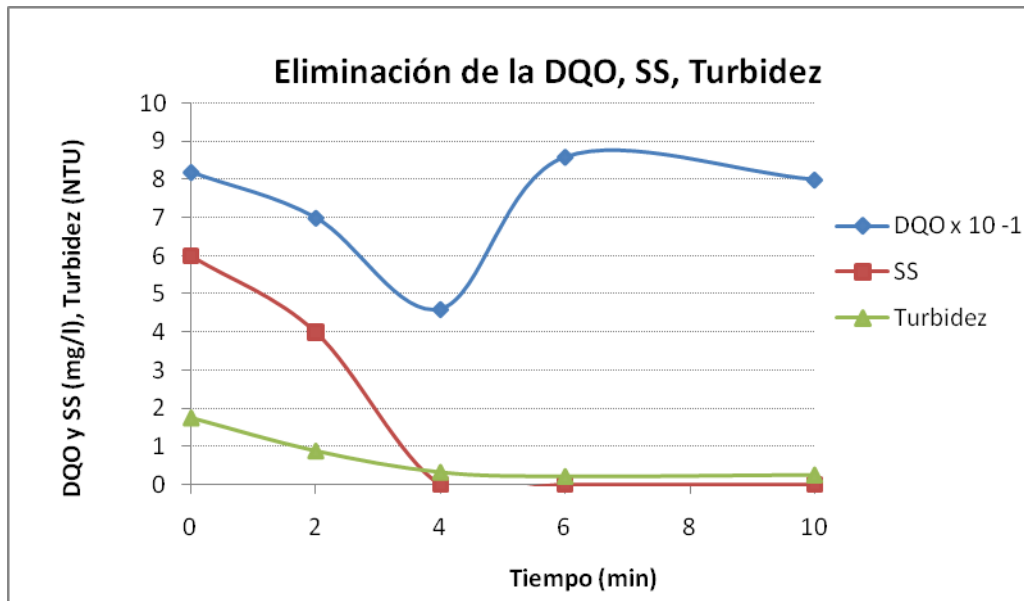


Figura 7.34. Eliminación de la DQO, SS y la turbidez a 20 V

En la tabla y gráfico siguientes, se muestran los resultados obtenidos del agua del decantador primario antes y después del tratamiento por electrocoagulación a 16V, utilizando la misma celda de aluminio de 1,4 cm de separación entre placas. En la fase de decantación se observa que los flóculos aglomerados ascienden formando una capa superficial. El tiempo de decantación en todos los casos fue de 30 minutos.

En el ensayo de 6 minutos de tiempo de retención en la cámara de electrocoagulación, los flóculos que habían ascendido comenzaron a caer al cabo de 30 minutos, pasando al agua a analizar, motivo por el cual hay más SS, mayor turbidez y DQO.

Tiempo min	Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conduct. $\mu\text{S}/\text{cm}$	SS mg/l	Turb. NTU	DQO mg/l
0	0		23,8	7,39	950	70	50,2	324
1	16	4,09	26,3	7,78	932	24	9,73	169
3	16	4,09	27,0	7,96	893	26	9,21	162
6	16	4,09	29,2	8,43	813	46	48,4	173

Tabla 7.15. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 1,4 cm de separación entre placas (16 V)

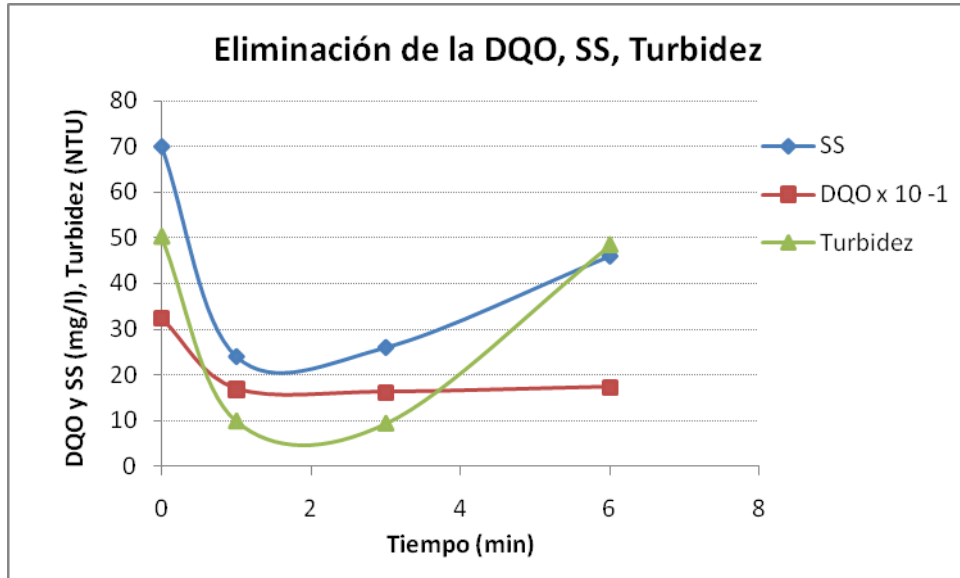


Figura 7.35. Eliminación de la DQO, SS, Turbidez con electrodos de Al a 16 V.

En la tabla y gráfico siguientes se muestran los resultados obtenidos del agua del decantador primario antes y después del tratamiento por electrocoagulación, con celdas de hierro a 30 V, el agua del electrocoagulador era de color verde oscuro. En la fase de decantación se observó que algunos flóculos quedaban en las proximidades de las paredes del cono, y los más ligeros, que no llegaban a aglomerarse, estaban dentro del clarificado, lo que dió un rendimiento del 74% para la turbidez y los SS, para los 6 minutos de tiempo de retención. El tiempo de decantación en todos los casos fue de 30 minutos.

Tiempo min	Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conduct. $\mu\text{S}/\text{cm}$	SS mg/l	Turb. NTU	DQO mg/l
0	0	0	21,8	7,34	973	70	50,2	324
3	30	4,09	27,2	8,31	936	26	32,2	161
6	30	4,09	30,0	8,60	895	18	13,1	158

Tabla 7.16. Resultados del agua tratada con reactor de hierro de 2,2 cm de separación entre placas. Agua del decantador primario (30 V)

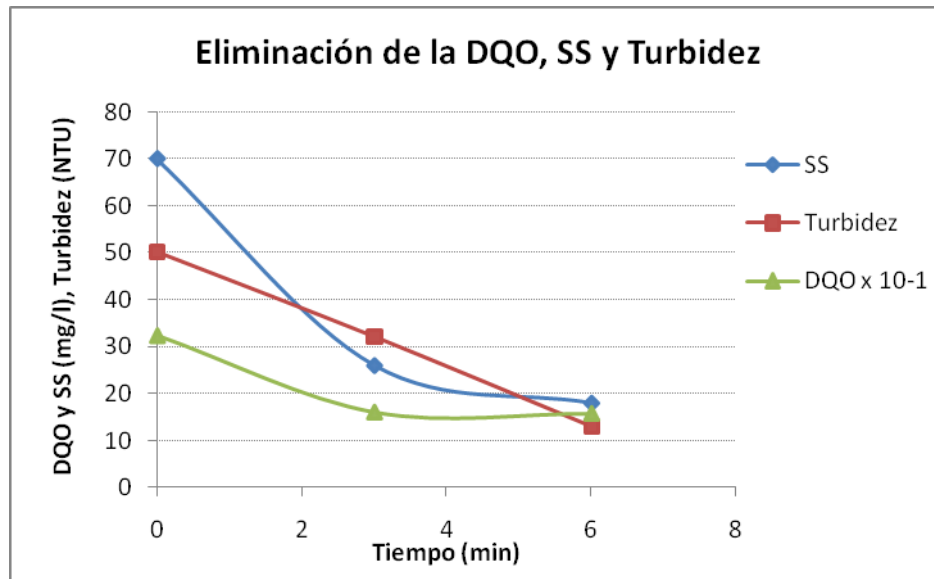


Figura 7.36. Eliminación de la DQO, SS, Turbidez con electrodos de Fe a 30 V

En la tabla y gráfico siguientes, se muestran los resultados obtenidos al tratar agua del río Manzanares, cerca de la depuradora de Viveros, (equivalente a aguas de secundario), antes y después del tratamiento por electrocoagulación con celda de aluminio a 10 V. El agua del electrocoagulador era de color blanquecino, al comienzo no se observaban los flóculos, pero conforme pasaba el tiempo se iban aglomerando y decantando. A los 30 min de decantación no llegaron a compactarse y el precipitado era de color crema. Para los 10 minutos de electrólisis el clarificado era muy bueno, pero los lodos separados eran escasos, ya que los flóculos se concentraron en la mitad del cono, dejando clarificado en la parte inferior y superior del cono. Al momento de extraer el clarificado se redisolvió la masa de lodos por el cual no se tomó en cuenta para los análisis.

Los mejores resultados se obtienen a los 6 minutos de electrólisis, alcanzando un 89% de eliminación de SS, un 95% de turbidez, y un 22% de eliminación de la DQO.

Tiempo min	Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conduct. $\mu\text{S}/\text{cm}$	SS mg/l	Turb. NTU	DQO mg/l
0			17,5	7,20	499	18	11,1	23
2	10	1,75	21,2	7,90	498	12	3,20	22
4	10	1,63	20,9	8,29	471	8	1,29	17
6	10	1,62	21,7	8,5	447	2	0,60	18
10	10	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 7.17. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 1,4 cm de separación entre placas (10 V)

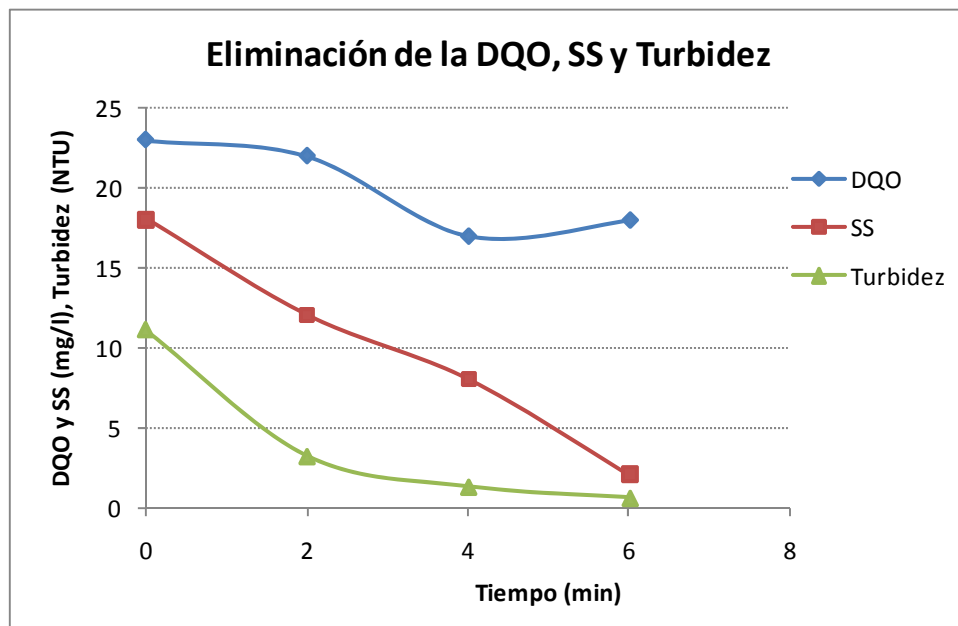


Figura 7.37. Eliminación de la DQO, SS, Turbidez con electrodos de Aluminio a 10 V

En la tabla y gráfico siguientes, se muestran los resultados obtenidos con agua del río Manzanares, (equivalente a aguas de secundario), antes y después del tratamiento por electrocoagulación con celda de aluminio a 15 V. Con 2 minutos de tiempo de retención en la electrólisis, se produjeron pocos flóculos y muy ligeros, que después de 30 minutos de decantación no llegaron a compactarse. Para tiempos de electrólisis de 4 y 6 minutos el clarificado era muy bueno, pero los flóculos eran muy esponjosos.

Los mejores resultados se obtienen a los 6 minutos de electrólisis, alcanzando un 89% de eliminación de SS, un 94% de turbidez, y un 74% de eliminación de la DQO.

Tiempo min	Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conduct. $\mu\text{S}/\text{cm}$	SS mg/l	Turb. NTU	DQO mg/l
0			17,0	7,29	499	18	11,1	23
2	15	2,63	20,8	7,65	505	12	2,40	13
4	15	2,51	21,3	8,42	471	4	0,85	15
6	15	2,45	22,2	8,65	446	2	0,64	6
10	15	2,40	24,2	8,83	416	-	-	-

Tabla 7.18. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 1,4 cm de separación entre placas (15 V)

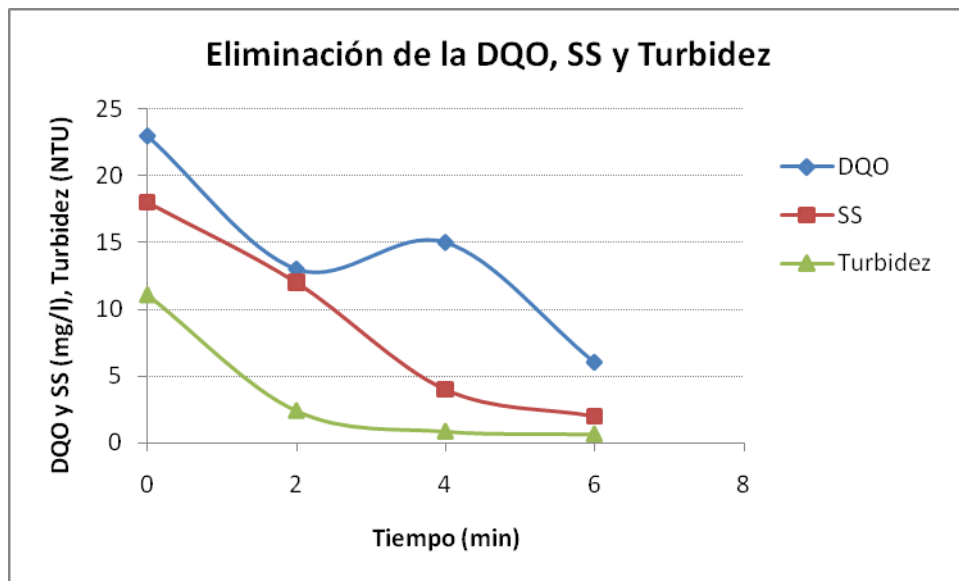


Figura 7.38. Eliminación de la DQO, SS, Turbidez con electrodos de Aluminio a 15 V

#### Conclusiones:

C-45 Se consiguen rendimientos bajos con aguas de salida del decantador primario, con electrodos de aluminio, con separación de 1,4 cm, diferencia de potencial 16 V, los flóculos son poco consistentes, obteniendo unos rendimientos del 46% en DQO, del 34% en SS y prácticamente nulo en turbidez. Con electrodos de hierro, con separación de 2,2 cm, diferencia de potencial 30 V, los flóculos son poco consistentes, obteniendo unos rendimientos del 50% en DQO, del 74% en SS y del 74% en turbidez.

C-46 Con aguas de salida de secundario, con tiempo de retención en la cámara de electrocoagulación, electrodos de aluminio con separación de 1,4 cm, se obtienen buenos resultados con una diferencia de potencial de 10 V, 89% en SS, 95% en turbidez y 22% en DQO. Al

realizar los mismos ensayos con diferencia de potencial de 15 V, los rendimientos para SS y turbidez son prácticamente los mismos, pero se mejora la reducción de DQO hasta el 74%.

### 7.3.2. Eficacia de la electrocoagulación sobre las aguas prepotables. SS, DQO y Turbidez (Objetivos 1,9 y 2.6)

En la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos con agua del río Manzanares cerca de la depuradora de Viveros antes y después del tratamiento por electrocoagulación con celda de aluminio a 15 V, el agua del electrocoagulador era de color blanquecino. Para los 2 minutos de tiempo de electrólisis habían pocos flóculos y muy ligeros que a los 30 min de decantación no llegaron a compactarse y el precipitado era de color crema. Para los tiempos de electrólisis de 4, 6 y 10 minutos el clarificado para el mayor tiempo era más limpio, pero los flóculos eran más esponjosos, en todos los casos los flóculos no se compactaban. Los mejores resultados se obtuvieron con 10 minutos de electrólisis, lo que nos dio un rendimiento del 96,2 % para la turbidez, 77,8 % para los SS, y 35,5 % para la DQO.

Tiempo min	Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conduct. µS/cm	SS mg/l	Turb. NTU	DQO mg/l
0			17	7,14	423	18	10,9	31
2	15	1,27	21	7,57	424	10	2,71	24
4	15	1,24	21,4	7,98	416	8	0,78	18
6	15	1,23	22,3	8,19	406	6	0,61	17
10	15	1,23	23,1	8,48	391	4	0,41	20

Tabla 7.19. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 2,1 cm de separación entre placas (15 V)

En la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos con agua del río Manzanares cerca de la depuradora de Viveros antes y después del tratamiento por electrocoagulación con celda de aluminio a 20 V, el agua del electrocoagulador era de color blanquecino. Con 2 minutos de tiempo de retención en la cámara de electrólisis, se generaban pocos flóculos, a los 30 min de decantación no llegaron a compactarse, siendo el precipitado de color crema. Para tiempos de retención, en la cámara de electrólisis, de 4, 6 y 10 minutos, el clarificado para el mayor tiempo era mejor, pero los flóculos eran más esponjosos, en todos los casos los flóculos no se compactaban.

Los mejores resultados se obtuvieron con 10 minutos de tiempo de retención en la electrolisis, dando un rendimiento del 97 % para la turbidez, 100 % para los SS, y 14,8 % para la DQO, lo cual puede deberse a la DQO soluble.

Tiempo min	Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conduct. $\mu\text{S}/\text{cm}$	SS mg/l	Turb. NTU	DQO mg/l
0			20,5	7,20	550	20	11,2	27
2	20	1,67	23,5	7,67	553	20	2,00	20
4	20	1,69	23,8	8,03	531	8	1,23	18
6	20	1,70	24,5	8,28	519	4	0,98	24
10	20	1,67	25,7	8,49	497	0	0,34	23

Tabla 7.20. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 2,1 cm de separación entre placas (20 V)

En la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos con agua del río Manzanares, antes y después del tratamiento por electrocoagulación con celda de aluminio a 35 V, el agua del electrocoagulador era de color blanquecino. Con 2 minutos de tiempo de retención en la electrólisis se formaban pocos flóculos, a los 30 min de decantación no llegaron a compactarse igual que en el caso anterior. Para los tiempos de electrólisis de 4, 6 y 10 minutos el clarificado, para el mayor tiempo, era mejor, pero los flóculos eran más esponjosos, en todos los casos los flóculos no se llegaron a compactar, y al realizar el trasvase del cono para los análisis los flóculos se dispersan y pasan al agua a analizar, observándose un incremento de la turbidez y los SS.

Los mejores resultados se obtuvieron con 6 y 10 minutos de electrolisis, dando un rendimiento del 90 y 80 % respectivamente para la turbidez, 78 y 44 % para los SS, y 52 - 53 % para la DQO.

Tiempo min	Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conduct. $\mu\text{S}/\text{cm}$	SS mg/l	Turb. NTU	DQO mg/l
0			17,0	7,28	499	18	11,10	23
2	35	2,33	21,3	8,18	544	8	1,60	15
4	35	2,20	23,4	8,15	476	4	0,68	15
6	35	1,84	25,5	8,72	451	4	1,09	11
10	35	2,16	27,6	8,82	426	10	2,20	10

Tabla 7.21. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 2,1 cm de separación entre placas (35 V)



**Resultados con agua del río Manzanares y celda de aluminio de 3,0 cm de separación entre placas.**

En la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos con agua del río Manzanares cerca de la depuradora de Viveros, antes y después del tratamiento por electrocoagulación, con celdas de aluminio a 20 V, el agua del electrocoagulador estaba turbia y no se apreciaban flóculos a los 2 minutos de tiempo de retención en la electrólisis, a los 15 min de decantación comienzan a formarse pero ascendían, formándose una ligera capa superior. A los 30 min de decantación se observan muchos flóculos en el clarificado. Para los tiempos de electrólisis de 4, 6 y 10 minutos los flóculos también ascienden formando una capa superior que conforme pasa el tiempo de reposo se rompen y caen, por lo que se han dado resultados muy bajos, y muchos sólidos.

Los mejores resultados se obtuvieron con 10 minutos de electrolisis, dando unos rendimientos del 50 % para la turbidez, y 23 % para la DQO.

Tiempo min	Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conductividad $\mu\text{S}/\text{cm}$	Turbidez NTU	DQO mg/l
0			16.1	7,16	399	11,8	30
2	20	0,65	19,6	7,23	400	12,1	41
4	20	0,66	19,9	7,25	391	5,22	27
6	20	0,67	20,3	7,64	387	4,41	28
10	20	0,71	21,3	7,95	379	5,75	23

*Tabla 7.22. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 3,0 cm de separación entre placas (20 V)*

En la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos con agua del río Manzanares cerca de la depuradora de Viveros, antes y después del tratamiento por electrocoagulación, con celdas de aluminio a 35 V. A los 2 minutos de tiempo de retención en la electrólisis, se observó que, a los 30 min de decantación, había flóculos en el clarificado. Para los tiempos de electrólisis de 4, 6 y 10 minutos los flóculos no se compactaron, siendo muy esponjosos.

Los mejores resultados se obtuvieron con 10 minutos de electrolisis, dando unos rendimientos del 92,5 % para la turbidez, 55,6 % para los SS y del 39,1 % para la DQO.

Tiempo min	Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conduct. µS/cm	SS mg/l	Turb. NTU	DQO mg/l
0			19,5	7,13	468	18	8,98	23
2	35	1,63	22,0	7,77	467	18	3,07	21
4	35	1,43	22,2	7,94	452	14	2,00	19
6	35	1,79	23,6	8,34	454	10	1,30	15
10	35	1,69	25,3	8,62	418	8	0,67	14

Tabla 7.23. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 3,0 cm de separación entre placas (35 V)

En la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos con agua del río Manzanares cerca de la depuradora de Viveros, antes y después del tratamiento por electrocoagulación, con celdas de aluminio a 50 V. A los 2 minutos de tiempo de retención en la electrólisis, se observó que, a los 30 min de decantación, el clarificado era bueno, con muy pocos flóculos como sobrenadante. Para los tiempos de electrólisis de 4, 6 y 10 minutos el clarificado era muy bueno, pero los flóculos no se compactaron, siendo esponjosos.

Los mejores resultados se obtuvieron con 10 minutos de tiempo de retención en la electrólisis, dando un rendimiento del 96,8 % para la turbidez, 83,3 % para los SS y 47,4 % para la DQO.

Tiempo min	Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conduct. µS/cm	SS mg/l	Turb. NTU	DQO mg/l
0			17,9	7,04	414	12	14,4	19
2	50	2,22	21,5	7,80	409	4	2,50	18
4	50	2,16	22,8	8,13	382	4	1,24	8
6	50	2,02	24,4	8,35	371	0	0,55	12
10	50	2,18	27,3	8,54	352	2	0,46	10

Tabla 7.24. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 3,0 cm de separación entre placa (50 V)

En la tabla y gráfico siguientes se muestran los resultados obtenidos con agua del río Manzanares cerca de la depuradora de Viveros, antes y después del tratamiento por electrocoagulación, con celdas de aluminio a 75V. A los 2 minutos de tiempo de retención en la electrólisis, se observó que, a los 30 min de decantación, el clarificado era bueno, con muy pocos flóculos como sobrenadante. Para los tiempos de electrólisis de 4, 6 y 10 minutos el clarificado era muy bueno y los flóculos no se compactaron, siendo esponjosos.

Los mejores resultados se obtuvieron con 10 minutos de tiempo de retención en la electrolisis, dando un rendimiento del 97,4 % para la turbidez, los SS 66,7 % y 68,4 % para la DQO.

Tiempo min	Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conduct. $\mu\text{S/cm}$	SS mg/l	Turb. NTU	DQO mg/l
0			17,9	7,04	414	12	14,4	19
2	75	3,42	24,9	8,16	402	6	1,02	15
4	75	3,51	28,4	8,35	372	4	0,44	13
6	75	3,32	30,1	8,46	362	4	0,51	6
10	75	3,51	25,3	8,62	339	4	0,37	6

Tabla 7.25. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 3,0 cm de separación entre placas (75 V)

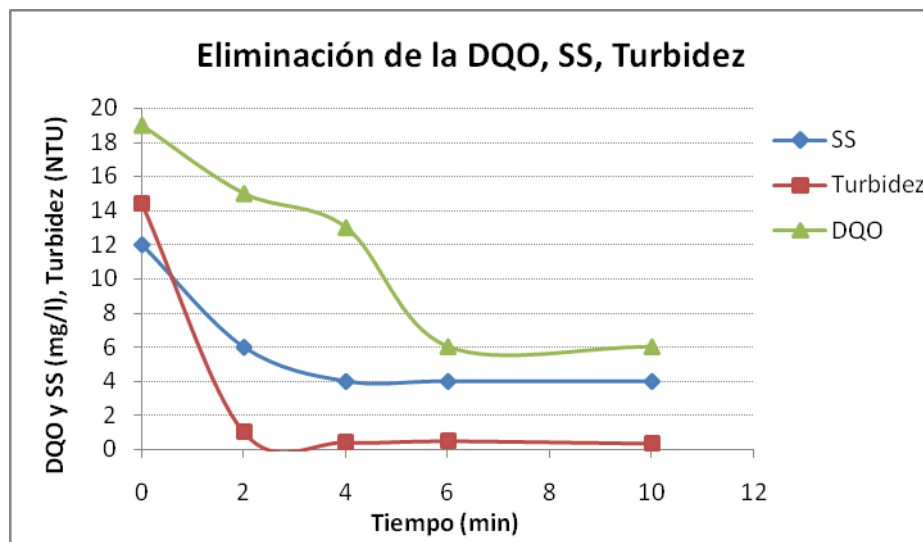


Figura 7.39. Eliminación de la DQO, SS, Turbidez con electrodos de Al a 75 V, y de 3,0 cm de separación entre placas.

En la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos con agua del río Manzanares cerca de la depuradora de Viveros, antes y después del tratamiento por electrocoagulación, con celdas de aluminio a 100 V. El clarificado en todos los casos era bueno, con muy pocos flóculos como sobrenadante, pero a los 6 minutos los flóculos no se compactan y quedan formando una especie de penacho.

Los mejores resultados se obtuvieron a los 4 y 6 minutos de electrolisis, lo que nos dio un rendimiento del 94 y 93% para la turbidez, un 89 y 78 % para los SS y un 30 y 35 % para la DQO.

Tiempo min	Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conduct. µS/cm	SS mg/l	Turb. NTU	DQO mg/l
0			17,5	7,20	499	18	11,1	23
2	100	3,67	26,1	8,04	517	8	1,24	18
4	100	3,88	32,6	8,35	465	2	0,64	16
6	< 100	4.04	39,9	8,43	448	4	0,79	15

Tabla 7.26. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 3,0 cm de separación entre placas (100 V)

### **Resultados con agua del río Manzanares y celda de aluminio con 4,7 cm de separación entre placas.**

En la tabla siguiente, se muestran los resultados obtenidos con agua del río Manzanares cerca de la depuradora de Viveros, antes y después del tratamiento por electrocoagulación, con celdas de aluminio a 75 V. A los 2 minutos de tiempo de retención de la electrólisis, los flóculos ascendieron formándose una capa ligera, pero también los más pesados decantaron. Para los tiempos de electrólisis de 4, 6 y 10 minutos el clarificado era bueno y los flóculos no se compactaron, siendo esponjosos.

Los mejores resultados se obtuvieron con 10 minutos de electrólisis, dando unos rendimientos del 93,5 % para la turbidez, 50 % para los SS y 56,5 % para la DQO.

Tiempo min	Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conduct. µS/cm	SS mg/l	Turb. NTU	DQO mg/l
0			15,8	7,18	379	16	12,4	23
2	75	1,34	19,9	7,81	379	10	2,18	18
4	75	1,37	21,3	8,22	374	8	1,31	13
6	75	1,40	22,8	8,33	368	8	1,07	7
10	75	1,47	25,6	8,56	356	8	0,80	10

Tabla 7.27. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 4,7 cm de separación entre placas (75 V)

En la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos con agua del río Manzanares cerca de la depuradora de Viveros, antes y después del tratamiento por electrocoagulación, con celdas de aluminio a 100 V. A los 2 minutos de tiempo de retención en la electrólisis, los flóculos decantados eran muy pocos, otros permanecían en el clarificado. Para los tiempos de electrólisis

de 4, 6 y 10 minutos el clarificado era bueno, los flóculos decantados no se compactaban, siendo esponjosos.

Los mejores resultados se obtuvieron con 10 minutos de electrolisis, lo que nos dio un rendimiento del 97,7 % para la turbidez, 50 % los SS y 69,6 % para la DQO.

Tiempo min	Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conduct. $\mu\text{S}/\text{cm}$	SS mg/l	Turb. NTU	DQO mg/l
0			18,0	7,50	385	16	12,4	23
2	100	1,93	22,4	8,17	379	12	2,22	12
4	100	1,96	23,8	8,34	371	8	1,18	7
6	100	1,99	26,0	8,44	364	6	0,76	7
10	100	2,20	31,7	8,50	354	8	0,29	7

Tabla 7.28. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 4,7 cm de separación entre placas (100 V)

En la tabla y gráfico siguientes se muestran los resultados obtenidos con agua del río Manzanares cerca de la depuradora de Viveros, antes y después del tratamiento por electrocoagulación, con celdas de aluminio a 150 V. A los 2 minutos de tiempo de retención en la electrólisis, se observan pocos flóculos decantados, otros permanecían en el clarificado. Para los tiempos de electrólisis de 4, 6 y 10 minutos el clarificado era bueno, los flóculos decantados no se compactaron, siendo esponjosos.

Los mejores resultados se obtuvieron con 10 minutos de electrolisis, dando unos rendimientos del 98,1 % para la turbidez, 88,9 % para los SS y 55 % para la DQO.

Tiempo Min	Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conduct. $\mu\text{S}/\text{cm}$	SS mg/l	Turb. NTU	DQO mg/l
0			14,5	7,65	377	18	12,8	20
2	150	2,88	21,5	8,14	375	10	1,16	17
4	150	3,04	27,3	8,36	366	2	0,50	16
6	150	3,44	34,4	8,40	364	4	0,22	11
10	150	4,03	47,0	8,42	357	2	0,24	9

Tabla 7.29. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 4,7 cm de separación entre placas (150 V)

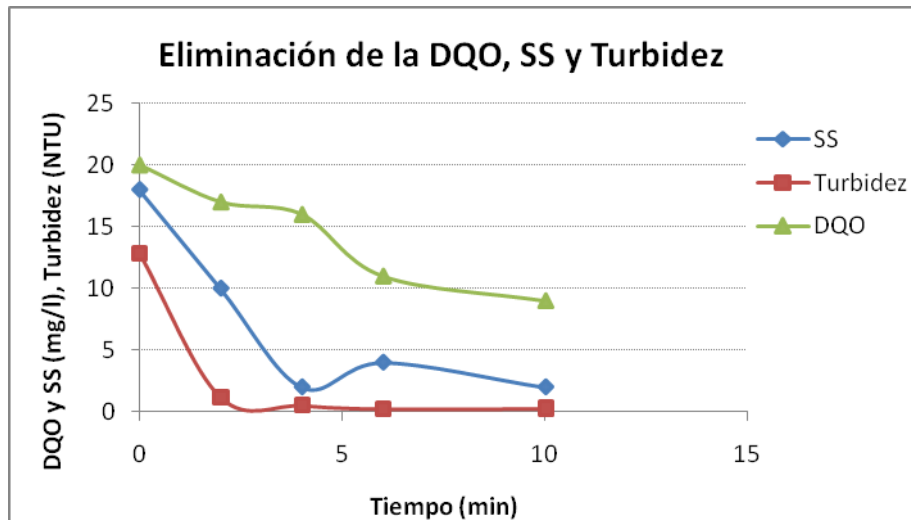


Figura7.40. Eliminación de la DQO, SS, Turbidez con electrodos de Al a 150 V, y 4,7 cm de separación entre placas.

#### Conclusiones:

C-47 Con aguas prepotables (SS entre 12 y 20 ppm, Turbidez entre 8,98 y 14,4 NTU, y DQO entre 19 y 31 ppm), con electrodos de aluminio, con diferencia de potencial entre 15 y 150 V, y separación de placas entre 1,4 y 4,7 cm, se ha observado como características comunes la presencia de flóculos en el clarificado, llegando con el incremento de voltaje (110 – 150 V) a aparecer como especies de penachos de flóculos finos.

C-48 Con aguas prepotables (SS entre 12 y 20 ppm, Turbidez entre 8,98 y 14,4 NTU, y DQO entre 19 y 31 ppm), con electrodos de aluminio, con diferencia de potencial entre 15 y 150 V, y separación de placas entre 1,4 y 4,7 cm, se ha observado un descenso en la conductividad, que en ningún caso ha superado el 18,1%. La oscilación va entre descensos del 4,7% al 18,1%. En esta variación no se justifica sea debida a la separación entre placas, ni a la diferencia de potencial.

C-49 Con aguas prepotables (SS entre 12 y 20 ppm, Turbidez entre 8,98 y 14,4 NTU, y DQO entre 19 y 31 ppm), con electrodos de aluminio, con diferencia de potencial entre 15 y 150 V, y separación de placas entre 1,4 y 4,7 cm, se ha observado que los rendimientos más altos se consiguen en los tiempos de contacto de 2 minutos, consiguiéndose los rendimientos óptimos entre los 4 y 6 minutos de retención.

C-50 Con aguas prepotables (SS entre 12 y 20 ppm, Turbidez entre 8,98 y 14,4 NTU, y DQO entre 19 y 31 ppm), con electrodos de aluminio, con diferencia de potencial entre 15 y 150 V, y separación de placas entre 1,4 y 4,7 cm, se ha observado, en relación con la reducción de SS, que a igual separación de placas se incrementa con la elevación de la diferencia de potencial. Los

rendimientos varían entre el 44% y el 89%. No se justifica la variación en rendimientos por la separación de placas.

C-51 Con aguas prepotables (SS entre 12 y 20 ppm, Turbidez entre 8,98 y 14,4 NTU, y DQO entre 19 y 31 ppm), con electrodos de aluminio, con diferencia de potencial entre 15 y 150 V, y separación de placas entre 1,4 y 4,7 cm, se ha observado, en relación con la DQO, que no se dan variaciones significativas en relación con la separación de placas o diferencia de potencial. La variación en rendimientos varía del 23% al 69,6%.

C-52 Con aguas prepotables (SS entre 12 y 20 ppm, Turbidez entre 8,98 y 14,4 NTU, y DQO entre 19 y 31 ppm), con electrodos de aluminio, con diferencia de potencial entre 15 y 150 V, y separación de placas entre 1,4 y 4,7 cm, se ha observado, en relación con la turbidez, que no se dan variaciones significativas en relación con la separación de placas o diferencia de potencial. La variación de rendimientos puede fijarse entre el 92,5% y el 98,1%.

### 7.3.3. Eficacia de la electrocoagulación sobre las aguas prepotables. N, P y metales (Objetivos 1,5, 1.8 y 2.6)

#### Experiencias realizadas con electrodos de aluminio, 3,1 cm de separación entre placas

Como una comprobación a los ensayos de la primera fase, se hace una comprobación nueva. En la tabla y gráfico siguientes se muestran los resultados obtenidos mediante electrocoagulación, utilizando una celda de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas. Los voltajes han variado entre 33,9 y 35 V, a este voltaje se observa que el pH ascendió bruscamente, llegando a los 10,47, a los 6 minutos de tratamiento. La eliminación del nitrógeno como nitrato fue de 68,1 %.

Tiempo Min	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temperatura °C	pH	Conductividad μS/cm	N-NO <sub>3</sub> mg/l
0	40,3	31,14	15,8	6,15	1375	47
1	35,0	31,14	17,2	10,28	1271	27
3	35,3	31,14	22,7	10,39	1167	22
6	33,9	31,14	25,0	10,47	1025	15

Tabla 7.30. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas

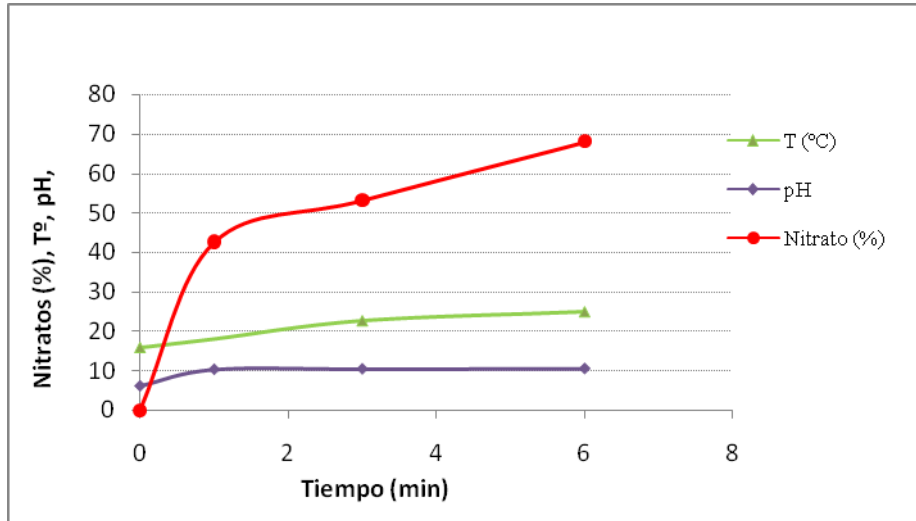


Figura 7.41. Variación de temperatura, pH y eliminación de nitrógeno con electrodos de Al, con 3,1 cm de separación entre placas.

En la tabla y gráfico siguientes se muestran los resultados obtenidos mediante electrocoagulación, utilizando una celda de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas en la eliminación de metales y fósforo. Los voltajes han variado entre 10 y 11 V. Se preparó una disolución de agua sintética conteniendo sulfatos de Cr, Cu, Ni, y fosfatos que presentó un pH de 3,6 que se utilizó como influente, se observó que según aumentaba el pH de la solución la eliminación de los metales era mayor. A los 2 minutos de tratamiento los rendimientos obtenidos fueron: para el Cu 99,6 %, para el Cr 91,7 %, para el Ni 69,5 % y se han obtenido una eliminación del fósforo del 87,3 %.

Tiempo Seg	Voltaje V	Temp. °C	pH	Conduct $\mu\text{S}/\text{cm}$	$\text{PO}_4^{-3}$ mg/l	Cu $\mu\text{g}/\text{l}$	Ni $\mu\text{g}/\text{l}$	Cr $\mu\text{g}/\text{l}$
0	10	19.9	3.65	900	31.4	2115	1082	72.7
30	10	20.4	4.60	859	24.6	419	730	10.7
60	11	21.6	6.10	754	10.6	88	440	6.0
120	11	22.5	8.38	704	4,0	8	330	6.0

Tabla 7.31. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas.



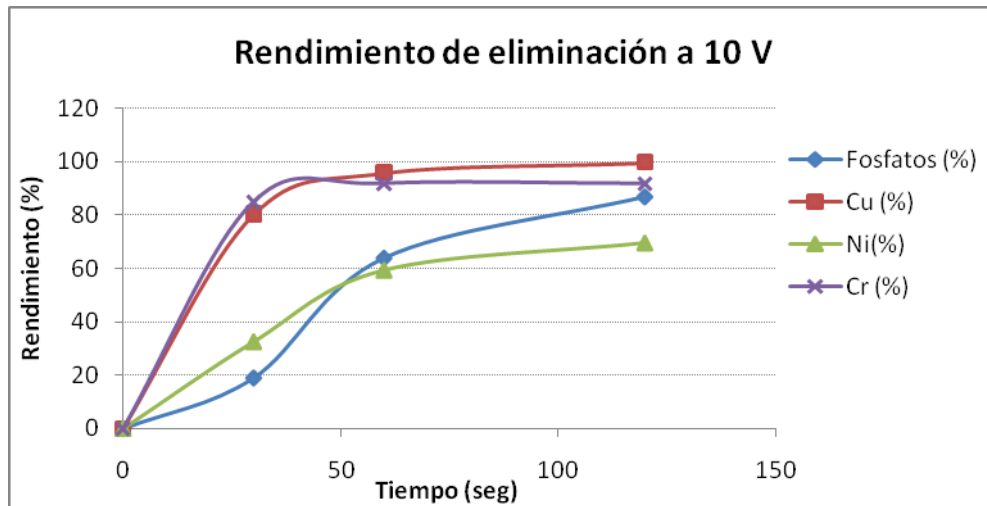


Figura 7.42. Porcentaje de eliminación de metales y fósforo con electrodos de Al de 3,1 cm de separación entre placas

Conclusiones:

C-53 Con electrodos de aluminio, separación entre placas de 3,1 cm, al elevar la diferencia de potencial de 10 a 40 V, no se observa ventaja alguna en la reducción de metales y fósforo.

### 7.3.4. Referente a los parámetros microbiológicos. (Objetivo 2.7)

#### Resultados con electrodos de aluminio, tratando agua del primario

En la tabla y gráfico siguientes se muestran los resultados de los rendimientos obtenidos en la eliminación de microorganismos mediante electrocoagulación, utilizando celda de aluminio a 16,5 V. Se obtuvo una eliminación escasa, creciente con el tiempo, de coliformes totales y de E. coli.

Tiempo (min)	Voltaje (V)	Colif. Totales (UFC/ 100 ml)	E. coli (UFC/ 100 ml)
0	16,6	$26,5 \cdot 10^4$	$72 \cdot 10^3$
3	16,5	$16,7 \cdot 10^4$	$39 \cdot 10^3$
6	16,5	$11,2 \cdot 10^4$	$23 \cdot 10^3$

Tabla 7.32. Resultados de eliminación de microorganismos, con electrodos de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas

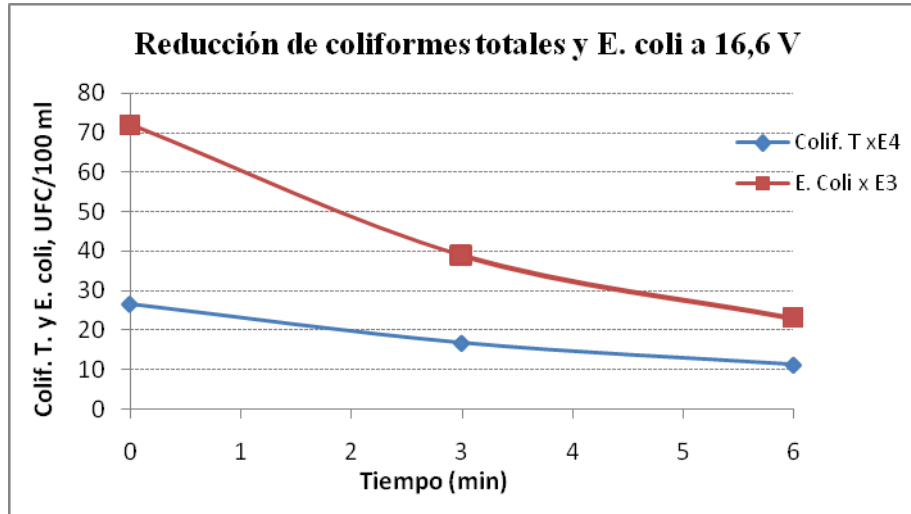


Figura 7.43. Eliminación de microorganismos con electrodos de aluminio.

En la tabla y gráfico siguientes se muestran los resultados de los rendimientos obtenidos en la eliminación de microorganismos mediante electrocoagulación, utilizando electrodos de aluminio a 50 V. Se obtuvo una eliminación muy baja de coliformes totales, y la reducción de E. coli fue insignificante.

Tiempo (min)	Voltaje (V)	Colif. Totales (UFC/ 100 ml)	E. coli (UCF/100 ml)
0	50	$35 \cdot 10^3$	$4,5 \cdot 10^3$
3	50	$18,5 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$

Tabla 7.33. Resultados de eliminación de microorganismos, con electrodos de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas

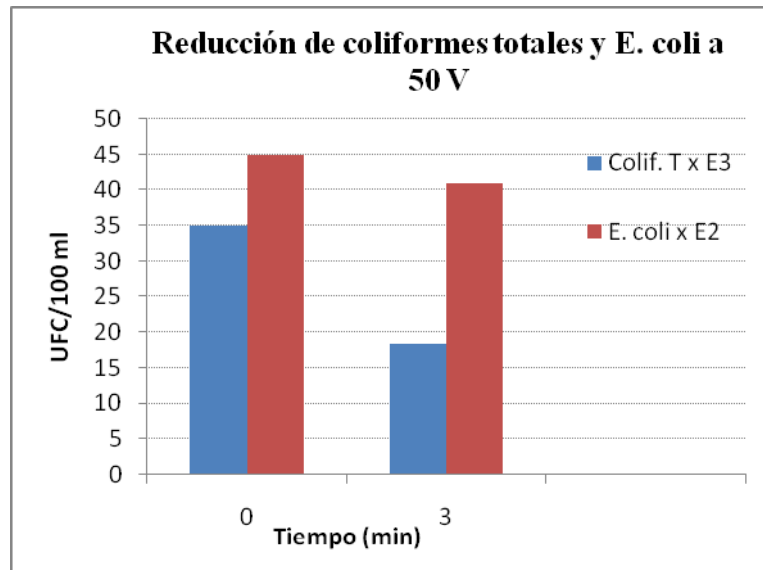


Figura 7.44. Eliminación de microorganismos con electrodos de aluminio

### **Resultados con electrodos de hierro, tratando agua del primario**

En la tabla y gráfico siguientes se muestran los resultados de los rendimientos obtenidos en la eliminación de microorganismos mediante electrocoagulación, utilizando celda de hierro a 30 - 31 V. Se obtuvo una eliminación importante de 3 décadas logarítmicas tanto en coliformes totales como de E. coli.

Tiempo (min)	Voltaje (V)	Colif. Totales (UFC/ 100 ml)	E. coli (UFC/ 100 ml)
0		$3 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^5$
3	30	$2,7 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^3$
6	31	$7 \cdot 10^3$	< 1000

Tabla 7.34. Resultados del agua tratada con reactor de hierro de 2,2 cm de separación entre placas

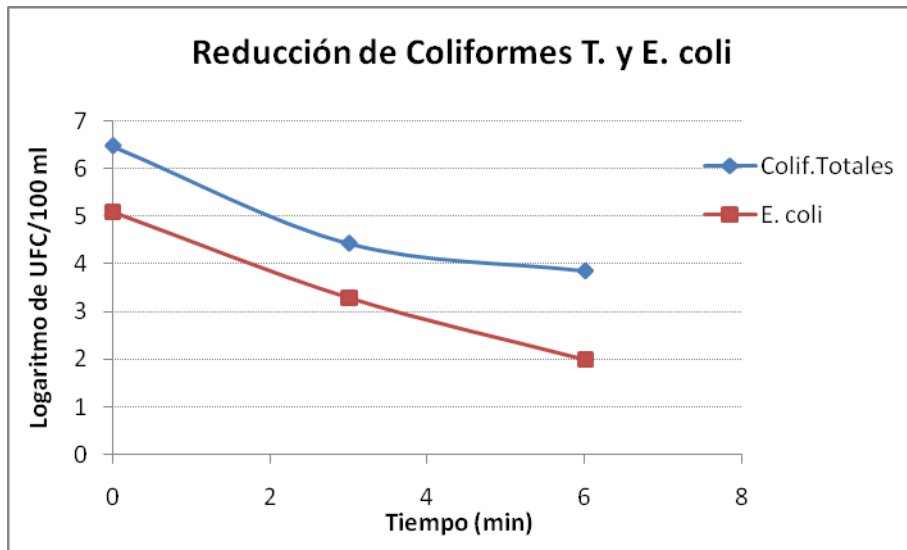


Figura 7.45. Eliminación de microorganismos con electrodos de hierro

En la tabla y gráfico siguientes se muestran los resultados de los rendimientos obtenidos en la eliminación de microorganismos mediante electrocoagulación, utilizando electrodos de aluminio, diferencia de potencial de 16 V. Se obtuvo una eliminación de 1 década logarítmica tanto en coliformes totales como en E. coli.

Tiempo (min)	Voltaje (V)	Colif. Totales (UFC/ 100 ml)	E. coli (UFC/ 100 ml)
0		$3 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^5$
3	16	$1,65 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^4$
6	16	$1,44 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^4$

Tabla 7.35. Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas

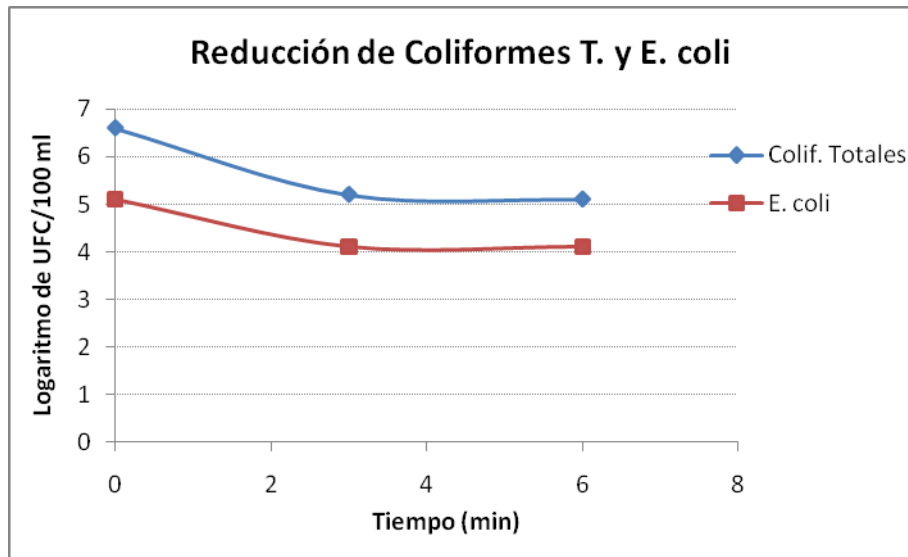


Figura 7.46. Eliminación de microorganismos con electrodos de aluminio

#### Conclusiones:

C-54 Con electrodos de aluminio, con diferencias de potencial entre 16 y 50 V, se observa una reducción escasa de coliformes totales y de E.coli, aunque incrementándose con el tiempo de actuación.

C-55 Con electrodos de hierro, separación de placas de 2,2 cm, diferencia de potencial 30 V, se obtuvo una eliminación importante de 3 décadas logarítmicas tanto en coliformes totales como de E. coli. Resultados que no justifican la solución como sistema de desinfección.

### **7.3.5. En concordancia al rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación en relación con la modificación de la dureza del agua. (Objetivo 2.8)**

La muestra de agua a ensayar procedía del río Tajo, tomada en Aranjuez y caracterizada por sus elevadas concentraciones de dureza cálcica, alcalinidad, bicarbonatos y sulfatos, así como su elevada conductividad eléctrica. En la tabla siguiente se muestran los datos antes y después del tratamiento mediante electrocoagulación, utilizando una celda con placas de aluminio de 1,4 cm de separación entre placas. Y en la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos con la celda de hierro de 2,2 cm de separación entre placas.

La explicación a la ligera bajada del pH durante la EC del agua del Tajo, se justifica que en el balance de generación de  $\text{OH}^-$  según la reacción ( $\text{Al}^{3+} + 3 \text{OH}^- \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3$ ), por la disolución del aluminio y la generación de ácidos causados por la EC de esta agua, que contiene entre otros componentes 550, 180, y 130 mg/l de sulfatos, bicarbonatos, y cloruros respectivamente, que a su vez generan parcialmente  $\text{H}^+$  en sus reacciones en el ánodo, predominando ligeramente sobre los iones  $\text{OH}^-$  generados por disolución del Al.

En estas experiencias se produjo una disminución de la dureza total, dureza cálcica, y alcalinidad como pueden observarse en las tablas y figura siguiente. Donde se hace una comparación de los resultados obtenidos utilizando celda de hierro y de aluminio al mismo voltaje.

Tiempo min	Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conduct. μS/cm	Dureza Total mg/l	Dureza Cálcica mg/l	Alcalinidad mg/l
0	10		12,3	8,00	2001	526	208,0	234
2	10	3,33	17,6	7,41	1975	486	190,4	187

Tabla 7.36. Resultados obtenidos con placas de aluminio en batch

Tiempo Min	Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conduct. μS/cm	Dureza Total mg/l	Dureza Cálcica mg/l	Alcalinidad mg/l
0	10		12,3	8,00	2001	526	208,0	234
2	10	2,79	16,9	7,99	1992	482	192,8	185

Tabla 7.37. Resultados obtenidos con placas de hierro en batch

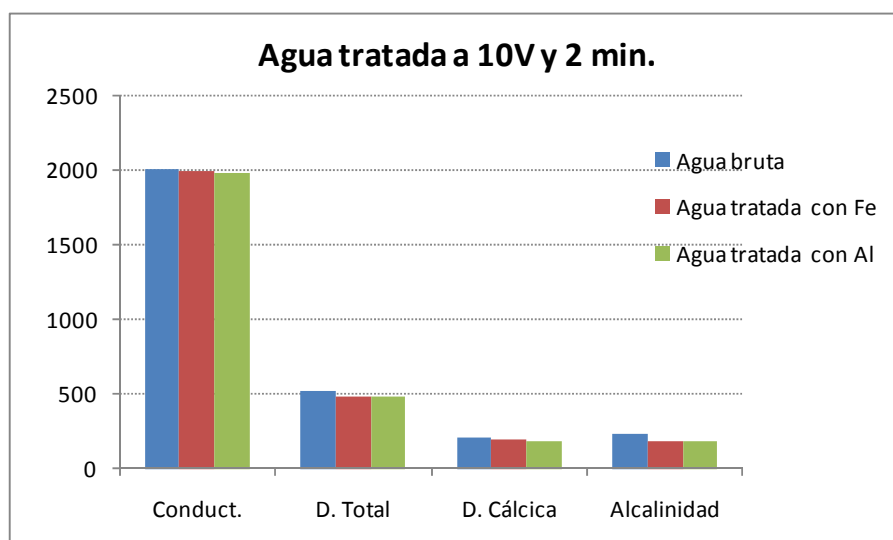


Figura 7.47. Comparación de la variación de la alcalinidad, durezas total y cálcica con electrodos de aluminio y hierro

En la tabla y gráfico siguientes se muestran los resultados obtenidos en la reducción de la dureza total, dureza cálcica y alcalinidad, utilizando electrodos de aluminio, variando el voltaje, a 10 V y 12 V, trabajando con caudal circulante. La reducción para la dureza total ha sido aproximadamente del 55 %, mientras que para los demás parámetros, la variación ha sido de menor cuantía.

Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Dureza Total (mg/l)	Dureza Cálcica (mg/l)	Alcalinidad (mg/l)
0		18,5	7,95	1961	310	204	227
10	3,20	20,2	7,49	1935	140	196	190
12	4,04	20,7	7,30	1897	130	192	173

Tabla 7.38. Resultados obtenidos con placas de aluminio a 10 y 12 V.

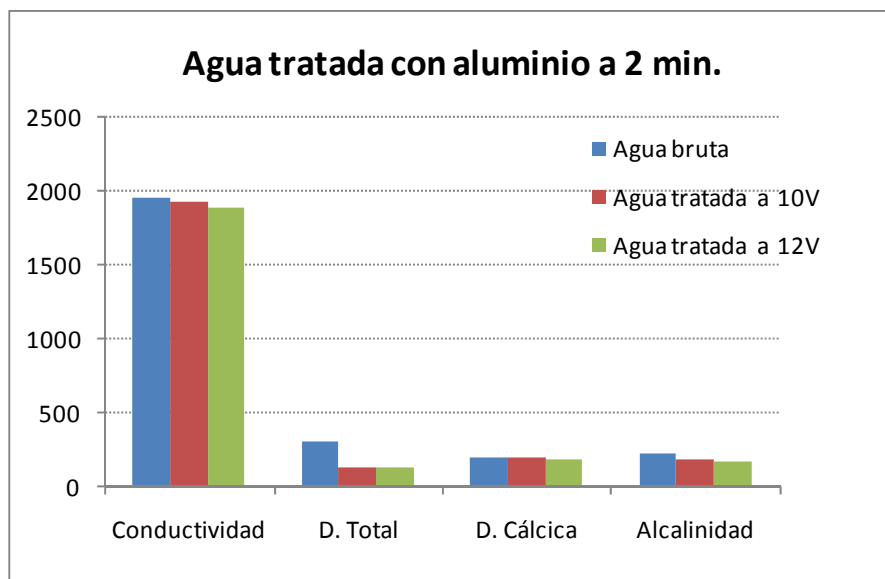


Figura 7.48. Comparación de la variación de la alcalinidad, durezas total y cálcica con electrodos de aluminio a 10 y 12 V.

En las tablas y gráfico siguientes se muestran los resultados obtenidos en la reducción de la dureza total, dureza cálcica y alcalinidad, utilizando electrodos de hierro, variando el voltaje, a 10 V y 14 V. La reducción de los parámetros antes mencionados ha sido muy ligera.

Se observa que el pH a 10 V se mantiene prácticamente constante y aumenta con el voltaje.

Tiempo Min	Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conduct. $\mu\text{S/cm}$	Dureza Total mg/l	Dureza Cálctica mg/l	Alcalinidad mg/l
0	10		12,3	8,00	2001	526	208,0	234
2	10	2,79	16,9	7,99	1992	482	192,8	185

Tabla 7.39. Resultados obtenidos con placas de hierro para la reducción de dureza con 10 V

Tiempo Min	Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conduct. $\mu\text{S/cm}$	Dureza Total mg/l	Dureza Cálctica mg/l	Alcalinidad mg/l
0	15		18,5	7,95	1961	310	204,0	227
2	14	4,04	20,7	8,17	1923	220	196,0	200

Tabla 7.40. Resultados obtenidos con placas de hierro para la reducción de dureza con 14 V

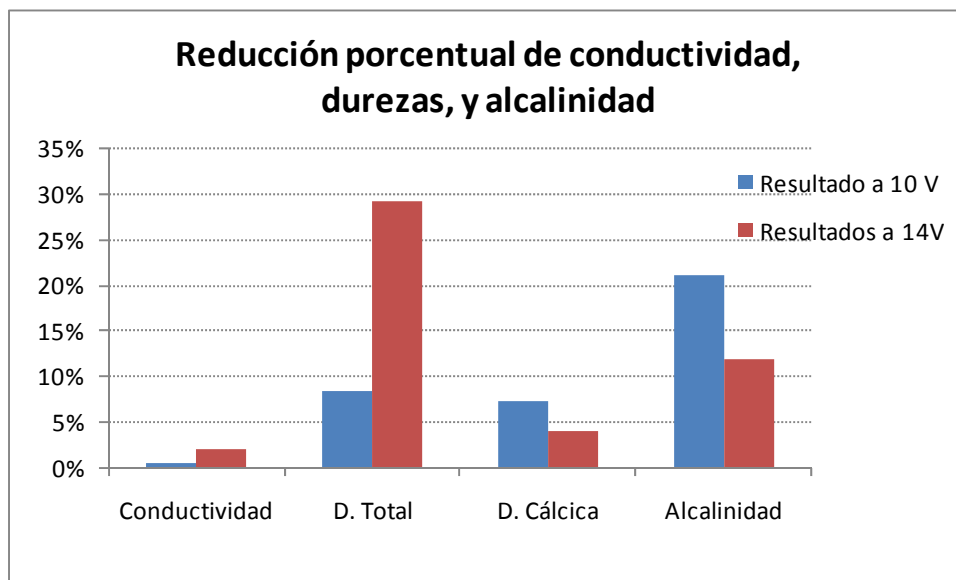


Figura 7.49. Variación porcentual de la conductividad, alcalinidad, dureza total utilizando electrodos de hierro a 10 y 14 V.

#### Conclusiones:

C-58 En todos los ensayos se produjo una disminución de la dureza total, dureza cálcica, y alcalinidad tanto con electrodos de aluminio como de hierro. En sistema batch los rendimientos son mínimos, mientras que, con caudal circulante, la reducción de la dureza total ha sido



aproximadamente del 55 %, mientras que para los demás parámetros, la variación ha sido de menor cuantía, utilizando electrodos de aluminio, variando el voltaje, a 10 V y 12 V.,

C-59 Con electrodos de hierro, separación de placas de 2,2 cm, con caudal circulante, la reducción de la dureza total, dureza cálcica y alcalinidad, variando el voltaje, a 10 V y 14 V., ha sido muy ligera.

### 7.3.6. En relación con el rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación con la modificación de la conductividad de las aguas efluentes del secundario.

En la tabla y gráfico siguientes se pueden observar la influencia de la conductividad eléctrica sobre la densidad de corriente, aplicando el mismo voltaje. Utilizando una celda electroquímica con electrodos de aluminio de 2,2 cm de separación entre placas.

Solución de 123 $\mu\text{S/cm}$		Solución de 478 $\mu\text{S/cm}$		Solución de 1027 $\mu\text{S/cm}$		Solución de 1892 $\mu\text{S/cm}$		Solución de 3410 $\mu\text{S/cm}$	
V	$\text{A/m}^2$	V	$\text{A/m}^2$	V	$\text{A/m}^2$	V	$\text{A/m}^2$	V	$\text{A/m}^2$
10	5,5	10	19,5	10	53,6	10	84,6	10	178,1
20	11,7	20	43,3	20	113,1	20	186,5	20	375,0
30	18,2	30	70,1	30	175,0	30	294,2	30	596,9
50	30,7	50	122,0	50	297,6	50	523,1	50	1043,8
70	43,0	70	179,9	70	357,1	68	776,9	54	1262,5
100	61,4	90	246,3	90	464,3				

Tabla 7.41. Resultados de la variación de la densidad de corriente ( $\text{A/m}^2$ ) a diferente conductividad eléctrica, respecto al voltaje aplicado.

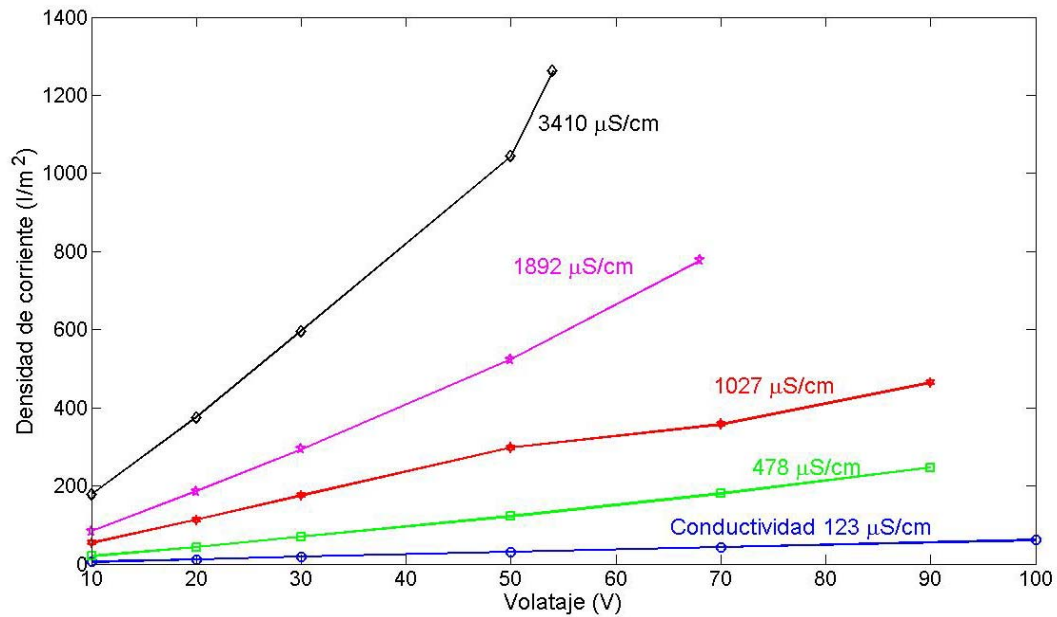


Figura 7.50. Variación de la densidad de corriente en función de la variación del voltaje y conductividad eléctrica

C-60 Con electrodos de aluminio, separación de placas de 2,2 cm, con caudal circulante, se han establecido las variaciones de la densidad de corriente, en relación con la diferencia de potencial y la conductividad del agua.

## 7.4. Resultados obtenidos de la 3ª Fase

### 7.4.1. Experimentación de la 3ª fase

Esta fase experimental arranca, después de realizar las pruebas funcionales de la planta piloto construida, con circulación de caudal en continuo.

En esta tercera fase experimental, se complementa la investigación ya realizada con los ensayos planificados para alcanzar los objetivos previstos, combinando electrodos de placas de grafito con electrodos de aluminio en la línea 1, y con electrodos de acero en la segunda línea. Las placas de grafito tenían unas dimensiones de 250 x 550 x 4mm.

Ya se ha comentado que existe un proceso electroquímico emergente, basado en la utilización de cátodos carbonáceos para la producción continua y controlada de radicales hidroxilos ( $\text{OH}^*$ ), por

la reducción electroquímica del  $O_2$ , en presencia de  $Fe^{2+}$  ó  $Fe^{3+}$ . Estos radicales son usados para la descontaminación del agua, conteniendo componentes orgánicos persistentes y acumulativos, a través de su transformación en compuestos biodegradables como son  $H_2O$  y  $CO_2$ .

Por otro lado, se ha contemplado que la oxidación indirecta con ánodos de grafito es ampliamente utilizado en el proceso de decoloración de aguas residuales de tintura. Es por ello que se experimentó con grafito, utilizándolo como cátodo, pese a no estar previsto en los objetivos iniciales de la investigación. Después de la revisión bibliográfica realizada se consideró interesante realizar unas pruebas iniciales a fin de comprobar la eficacia de remoción de contaminantes.

El caudal de entrada a las celdas de electrocoagulación se puede variar regulando las bombas dosificadoras según los requerimientos deseados, desde 10 a 100% del caudal. El caudal máximo que entraba a las celdas donde se dispusieron los electrodos de Al y Fe era de 144 l/h aproximadamente. Se ha experimentado también con el 50% del caudal máximo, en ambas celdas.

El tiempo de retención entre electrodos se calculó según la ecuación:

$$Tr = V_{(p)}/Q,$$

Donde  $V_{(p)}$  es el volumen entre placas y Q el caudal en l/h.

El tiempo de retención era de 1,62 minutos, por canal, y como se ha trabajado con 2 canales idénticos, el tiempo de retención total es de 3,24 minutos a caudal máximo.

El agua tratada, que sale de los electrocoaguladores, puede pasar a un decantador o a un flotador para su clarificación bien sea por sedimentación o separación por flotación por aire disuelto. Ambos tanques, decantador y flotador tienen, un volumen de 180 litros, por lo tanto el tiempo de retención en el decantador o flotador, ( $t = V/Q$ ), es de 1, 25 horas.

Todas las experimentaciones se han realizado a temperatura ambiente. La intensidad de corriente y los voltajes han sido variados para realizar una comparación de la eficiencia de eliminación de los contaminantes presentes en el agua residual, según los objetivos propuestos en esta tesis.

El tratamiento en continuo duraba 1,30 horas. Al cabo de este tiempo se tomaban las muestras, se dejaban decantar durante una hora y se llevaban al laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la E.T.S.I. de Caminos para su posterior análisis. Después de cada experimentación se lavaban las celdas con agua potable con el fin de eliminar las impurezas y dejarlo limpio para la siguiente experimentación.

Conclusiones:

C-61 Uno de los parámetros básicos de diseño, a escala piloto, es la relación de superficie electrolítica sobre el volumen de la disolución o del reactor, a escala laboratorio (A/V), que es una medida del potencial para la liberación de coagulante y burbujas a un sistema (sobre una base volumétrica). La densidad de corriente, definida como la corriente por un área activa de electrodo, es otro parámetro de diseño de escala utilizado.

C-62 Relacionando el rendimiento de la eliminación de la DQO con el tiempo de electrocoagulación, en todos los reactores antes mencionados, se determinó un (A/V) óptimo. Para nuestro caso fue de 21,27 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, y una densidad de corriente de 95,61 A/m<sup>2</sup>, con un tiempo de electrocoagulación de 4 minutos. Para la misma relación (A/V), y un tiempo de electrocoagulación de 6 minutos se obtiene una densidad de corriente de 68,29 A/m<sup>2</sup>. En ambos casos el rendimiento de eliminación de la DQO fue próximo a 70% y además se consiguió una eliminación de la turbidez del 91%. Se ha partido de estas relaciones de escala porque los contaminantes y el tipo de reactor son similares.

C-63 La relación (A/V) = 21,27 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, y densidad de corriente de 68,29 A/m<sup>2</sup>, a nivel laboratorio, permitió determinar la masa de aluminio disuelto por el proceso de electrocoagulación, que fue de 6,36 mg/m<sup>2</sup> área del electrodo, determinado según la ecuación  $m(\text{gramos Al}^{3+}) = \frac{Q M}{nF}$ . Con esta relación se trabajó hasta una densidad de corriente de 196 A/m<sup>2</sup>. Donde Q es la cantidad de electricidad que pasa por la celda en un determinado tiempo, M es el peso molecular del Al, n es el número de electrones intercambiados por la molécula o ión de sustancia, F es la constante de Faraday (96488 Culombios/mol).

25-05-2010

Se llenó el tanque de alimentación 1 con agua que sale del decantador secundario. Se tarda 47 minutos en llenar. Una vez llena se procedió a poner en funcionamiento la bomba de impulsión a la celda nº 2'

- Experimentación con la celda nº 2 con placas de aluminio

Las separaciones entre el primer par de placas es de 4,76; 4,66 la distancia entre placas promedio es 4,71 cm, la primera es (-) y la segunda (+), y entre ellas hay una placa de aluminio sin corriente (no conductora). Luego de polo (+) anterior, hay una placa sin corriente, luego otra placa polo (-), placa sin corriente y viene el polo (+), el segundo par formado por positivo anterior y negativo del siguiente, la separación entre placas es 4,52; El tercer par tiene una distancia entre placas de 4,31; 4,41 cm, y la distancia promedio entre placas es de 4,37 cm.

La distribución era:

(-) / (+) / (-) / (+)

La celda electrolítica se llena en 20 minutos

Se trabaja en continuo, Caudal promedio de entrada fue de 137,1 l/h y el caudal promedio de salida fue de 138,4 l/h. El índice volumétrico a los 30 minutos ( $V_{30}$ ) 26 ml.

Se conecta las 2 fuentes de alimentación en la celda. La fuente nº 1 inicia con un voltaje de 154 V y una intensidad de 4,02 A. Durante la experimentación que duró 45 minutos la intensidad ha variado desde 4,92 – 4,98 A y el voltaje de 189 151 V. La fuente nº 2 inicia con un voltaje de 187 V y 4,13 A. Y durante los 45 minutos de experimentación ha variado 4,63 A y 187 V a 4,72 A y 187 V.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	21,2	7,14	5,78	839	6,22	32	0,65	22	0,49	46
Salida	22,5	7,53	-	822	1,78	23	0,0	16	2,72	23

Tabla 7.42. Resultados obtenidos con placas de aluminio con la celda nº 2

- Experimentación trabajando con la celda 1 con placas de acero.

Se traslada las pinzas de la celda 2 a la celda 1. Se coloca de la siguiente manera:

(+) / (-) / (+) / (-)

Las separaciones entre el primer par de placas conductoras es de 4,76; 4,66 cm; la distancia entre placas promedio es 4,71 cm, la primera es (+) y la segunda (-), y entre ellas hay una placa de acero sin corriente (no conductora). Luego, el segundo par formado por el polo (-) anterior y el polo (+) del siguiente tiene una separación promedio de 4,56 cm, en el medio hay una placa sin corriente. Posteriormente, el siguiente par que va conectada a la otra fuente de alimentación tiene una distancia entre placas de 4,70; 4,50; 4,12 cm, y la distancia promedio entre placas es de 4,44 cm, la disposición es: (+) (-) y entre ellas hay una placa conductora.

La celda se tarda en llenar 20 minutos aproximadamente

El caudal de entrada a la celda es de 143,3 l/h y de salida al decantador es de 144 l/h.

Igual que en caso anterior, se conectó las 2 fuentes de alimentación en la celda. La fuente nº 1 inicia con un voltaje de 33 V y una intensidad de 4,98 A. Durante la experimentación que duró 35 minutos la intensidad casi no variado 4,97A y el voltaje de 32V. La fuente nº 2 inicia con un voltaje de 36 V y 4,99 A. Y a los 35 minutos de experimentación fue de 4,99 A y 35V.

A los 30 minutos el índice volumétrico fue cero, no ha coagulado y el agua era de color rojizo.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	21,9	7,33	6,65	847	6,22	32	0,65	22	46
Salida	21,9	7,44	-	821	8,61	22,5	0,4	15	23

Tabla 7.43. Resultados obtenidos con placas de acero con la celda nº 1

27 – 05- 2010

Se comenzó la experimentación a las 9:30 minutos. Se conecta las bombas de alimentación y el tanque se llena a las 10:40 minutos.

La celda se tarda en llenar 20 minutos aproximadamente

El caudal de entrada a la celda es de 143,3 l/h y de salida al decantador es de 144 l/h.

Igual que en caso anterior, se conectó las 2 fuentes de alimentación en la celda. La fuente nº 1 inicia con un voltaje de 33 V y una intensidad de 4,98 A. Durante la experimentación que duró 35 minutos la intensidad casi no variado 4,97A y el voltaje de 32V. La fuente nº 2 inicia con un voltaje de 36 V y 4,99 A. Y a los 35 minutos de experimentación fue de 4,99 A y 35V.

A los 30 minutos el índice volumétrico fue cero, no ha coagulado y el agua era de color rojizo.

Se trabajó con la celda 2, que contiene placas de aluminio.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	21,0	6,90	5,56	751	3,57	5,5	0,4	12	0,49	37,5
Salida	26,3	8,09	7,28	777	1,64	5,0	0,0	9	2,72	25

Tabla 7.44. Resultados obtenidos con placas de aluminio con la celda nº 2

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$5,6 \times 10^5$	$5,5 \times 10^4$
Salida	$3,8 \times 10^3$	$2 \times 10^2$

Tabla 7.45. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con placas de aluminio con la celda nº2

28-05-2010

Se comienza el llenado del depósito de alimentación 1 a las 9:45 minutos con las bombas 1 y 4.

Disposiciones de las placas:

(+) / (-) / (+) / (-)

El caudal de entrada a la celda es de 133,33 l/h en promedio.

Se fija las fuentes de alimentación de la siguiente manera:

F1: 4,98 A, 156 V, se observa que baja inmediatamente la tensión 119 V y se mantiene los 4,98A. Transcurridos los 5 minutos el voltaje era de 118 V, a los 15 min 118 V, a los 25 min 119 voltios.

F2: 4,99 A, 85 V, se observa que baja inmediatamente la tensión a 80 V. Después de los 5 min la tensión era 79 V y permaneció constante hasta los 30 minutos que dura la experimentación.

Se extrae 2 muestras para el cono inmo y se deja en reposo 30 min, transcurridos ese tiempo se tiene un índice volumétrico a los 30 minutos de 32 ml, y de 30 ml.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	20,7	6,93	5,93	731	5,70	5,5	0,6	16	0,13	48
Salida	24,4	7,50	5,22	749	1,56	3,0	0,0	10	2,62	17

Tabla 7.46. Resultados obtenidos con placas de aluminio

Experimentación con placas de acero.

Se disponen las placas de la siguiente manera: (-) / (+) / (-) / (+), primero se coloca las pinzas de la fuente nº 2, luego las pinzas de fuente nº 2. Se observa que salen burbujas de la placa conductora. Hay generación de espumas a la entrada el color del agua es verdoso y a la salida de color amarillo.



Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	21,2	6,83	5,99	754	5,70	5,5	0,6	16	48
Salida	22,1	7,34	9,22	766	3,74	4,0	0,0	16	15,5

Tabla 7.47. Resultados obtenidos con placas de acero

31 – 05 – 2010

Se comienza llenando el depósito de alimentación<sup>1</sup> a las 9,25 con las 2 bombas, el agua que entra a la planta de observa bastante turbia en comparación con otros días.

La disposición de las pinzas son: fuente 2 (-) / (+) / fuente 1 (-) / (+).

- **Se trabaja con celda de aluminio**

Las distancias entre las placas donde se ubican las pinzas son: Par (1-3) 4,78; 5,1; 4,99; 5,14; 5,14 = 5,03 cm.

Par (3-5) 4,55; 4,58; 4,52; 4,64 = 4,57 cm promedio

Par (5-7) 4,19; 4,48; 4,49 = 4,39 cm en promedio

Distancias entre placas de electrodo y conductora:

Par (1-2) 2,45; 2,55 = 2,50 cm en promedio

Par (2-3) 2,26; 2,33; 2,26 = 2,28 cm en promedio

Par (3-4) 2,43; 2,00; 2,00 = 2,14 cm en promedio

Par (4-5) 2,00; 2,00; 2,00 = 2,00 cm en promedio

Par (5-6) 1,96; 2,21; 2,32 = 2,16 en promedio

Par (6-7) 2,21; 1,98; 2,14 = 2,11 en promedio

Se comienza el llenado de la celda de electrocoagulación a la 10:12 am.

Se fija la intensidad en las fuentes de alimentación

Fuente 1: 4,99 A y 126V; 4,99 A y 103 V; inicio de la EC 4,99 A y 81V, al final de la experimentación 4,98 A y 69 V.

Fuente 2: 4,99 A y 81 V; 4,99 A y 76 V, inicio de la EC 4,99 A y 70 V, al final de la experimentación 4,99 A y 67 V.

Caudal promedio = 131, 47 l/h

Índice volumétrico  $V_{30} = 27$  ml se observa gran cantidad de flóculos dispersos

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	22,1	7,10	5,76	803	8,30	25	1,5	30	0,17	66
Salida	23,2	7,79	6,72	822	1,77	15,5	0,15	9	2,23	16

Tabla 7.48. Resultados obtenidos con celda de aluminio

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$1,18 \times 10^6$	$7,0 \times 10^5$
Salida	$1,58 \times 10^4$	$1,9 \times 10^3$

Tabla 7.49. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con celda de aluminio

- Experimentación con celda de acero

Disposición de las pinzas: F1: (+) / (-), F2: (+) / (-)

Distancias entre pares de electrodos:

Par (1-3) 4,91; 5,00; 4,89 = 4,93 cm en promedio

Par (3-5) 4,60; 4,50; 4,48 = 4,52 cm en promedio

Par (5-7) 4,44; 4,60; 4,90 = 4,65 cm en promedio

Se fija los voltajes y las intensidades de las fuentes de alimentación:

F1: 6,99 A y 49 V al final de la experimentación 6,99 A y 47 V.

F2: 6,99 A y 45 V al final de la experimentación 6,99 A y 43 V.

Índice volumétrico  $V_{30} = 12$  ml. Gran cantidad de flóculos en suspensión.

El caudal promedio 143,95 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	23	7,16	5,46	834	8,30	25	1,5	30	66
Salida	25,2	7,61	8,46	847	4,73	18,5	0,1	12	26,5

Tabla 7.50. Resultados obtenidos con celda de acero

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$1,18 \times 10^6$	$7,0 \times 10^5$
Salida	$1,75 \times 10^4$	$3,9 \times 10^3$

Tabla 7.51. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con celda de acero

1 – 06 – 2010

Electrodos de aluminio

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	23,2	7,50	6,02	920	11,8	30	2,0	41	0,14	81,5
Salida	25,2	8,17	5,28	923	1,44	27	0,1	3	2,63	3

Tabla 7.52. Resultados obtenidos con electrodos de aluminio

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$2,69 \times 10^6$	$4,6 \times 10^5$
Salida	$3,12 \times 10^4$	$7,25 \times 10^3$

Tabla 7.53. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con electrodos de aluminio

#### Electrodos de acero

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	23,0	7,35	4,88	871	11,8	30	2,0	41	81,5
Salida	25,0	7,86	8,49	849	2,15	26,5	0,1	7	30,5

Tabla 7.54. Resultados obtenidos con electrodos de acero

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$2,69 \times 10^6$	$4,6 \times 10^5$
Salida	$5,85 \times 10^4$	$1,96 \times 10^4$

Tabla 7.55. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con electrodos de acero

10-6-2010

#### Nuevas placas

Se han colocado nuevas placas de aluminio, las distancias entre placas electrodos con una placa conductora intermedia son:

Placas electrodo, 1-3: 4,86; 4,69; 4,70 = 4,75 cm, se han colocado las pinzas de la fuente F1.

Placas electrodo 5-7: 4,72 cm, se han colocado las pinzas de la fuente F2

Se fijan a 5 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
4,98 A	50 V	4,99 A	53 V	1 seg
4,98 A	49 V	4,99 A	52 V	10 min
4,97 A	50 V	4,99 A	52 V	20 min
4,97 A	50 V	4,99 A	53 V	30 min
4,97 A	51 V	4,99 A	53 V	40 min

El caudal promedio de entrada y salida de la celda es de 133,8 l/h.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	20,6	7,06	6.85	541	2,85	3	0,5	N.A	66
Salida	22,1	7,80	4,68	516	0,95	1	0,0	N.A	24

Tabla 7.56. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 5 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,71 y 4,76 cm

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$5,9 \times 10^5$	$3,26 \times 10^4$
Salida	$6,5 \times 10^2$	$2,0 \times 10^2$

Tabla 7.57. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de aluminio

11-6-2010

Distancia entre electrodos

1-3: 4,76; 4,71 = 4,735 cm posiciones (+)/(-)

5-7: 4,74; 4,78 = 4,76 cm, Posiciones (+)/(-)

Se fijan a 5 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
4,98 A	46 V	4,99 A	49 V	1 seg
4,98 A	46 V	4,98 A	48 V	2 min
4,98 A	46 V	4,99 A	48 V	10 min
4,97 A	45 V	4,99 A	48 V	20 min
4,97 A	46 V	4,99 A	48 V	45 min
4,97 A	46 V	4,99 A	48 V	55 min

El caudal promedio es 133,47 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	20,2	7,00	7,22	591	3,04	5	0,7	10,5	0,02	42
Salida	22,1	7,69	4,83	574	1,15	4	0,0	9,5	0.525	21

Tabla 7.58. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 5 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,73 y 4,76 cm

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$4,4 \times 10^5$	$1,67 \times 10^4$
Salida	$1,55 \times 10^3$	$2,0 \times 10^2$

Tabla 7.59. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de aluminio

14-6-2010

## ALUMINIO

### Distancia entre electrodos

1-3: 4,62; 4,55; 4,64 = 4,60 cm

5-7: 4,80; 4,87; 4,84 = 4,84 cm

Se fijan a 5 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
5,0 A	46 V	5,0 A	51 V	1 seg
4,98 A	45 V	4,99 A	47 V	10 min
4,98 A	44 V	4,99 A	46 V	32 min
4,97 A	45 V	4,99 A	46 V	42 min

El caudal promedio es 137,67 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	20,8	6,58	4,41	606	10,1	6	1,7	26	0,13	60,5
Salida	23,0	7,19	4,76	588	0,71	3	0,0	9	2,98	20

Tabla 7.60. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 5 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,60 y 4,84 cm

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$2,32 \times 10^6$	$2,76 \times 10^4$
Salida	$1,7 \times 10^3$	4

Tabla 7.61. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de aluminio

## HIERRO

### Distancia entre electrodos

1-3: 4,70; 4,71; 4,71 = 4,706 cm

5-7: 4,68; 4,77; 4,77 = 4,74 cm

Se fijan a 5 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
5,0 A	43 V	5,0 A	44 V	1 seg
4,98 A	43 V	4,99 A	44 V	1 min
4,98 A	43 V	4,99 A	43 V	2 min
4,97 A	40 V	4,99 A	39 V	15 min
4,97 A	39 V	4,99 A	40 V	45 min
4,97 A	39 V	4,99 A	40 V	60 min

El caudal promedio es 143,5 l/h.

El agua que sale del electrocoagulador es de color verdoso, en la superficie se forma una capa de partículas de color amarillo.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	21,5	6,77	4,45	614	10,1	6	1,7	26	60,5
Salida	22,9	7,58	0,10	610	17,5	3	0,1	12	26

Tabla 7.62. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 5 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,71 y 4,74 cm

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$2,32 \times 10^6$	$2,76 \times 10^4$
Salida	$2,0 \times 10^3$	3

Tabla 7.63. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de hierro

15 – 06-2010

## HIERRO

El agua de entrada está bastante turbia.

Distancia entre electrodos



1-3: 4,47; 4,60; 4,52; 4,54 = 4,53 cm

5-7: 4,65; 4,77; 4,88 = 4,766 cm

Se fijan a 5 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
5,0 A	43 V	5,0 A	44 V	1 seg
4,99 A	42 V	4,99 A	44 V	1 min
4,98 A	39 V	4,99 A	39 V	7 min
4,98 A	38 V	4,99 A	39 V	50 min

El agua que sale del electrocoagulador es de color verdoso con muy poca espuma en la superficie y se observa una capa metálica de color verde oscuro ligeramente amarillo.

El caudal promedio es 144,86 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	20,8	6,73	5,2	625	70,01	10	3,6	69	141
Salida	22,7	7,27	3,76	601	7,66	3	0,0	7	22,5

Tabla 7.64. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 5 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,53 y 4,77 cm

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$4,02 \times 10^6$	$1,8 \times 10^5$
Salida	283	1

Tabla 7.65. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de hierro

## ALUMINIO

Distancia promedio entre electrodos:

1-3: 4,43 cm

5-7: 4,65 cm

Distancia entre placas que separan la ubicación de las fuentes F1 y F2.

3-5: 5,14; 5,26; 5,34 = 5,25 cm

Se fijan a 5 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
5,0 A	43 V	5,0 A	47 V	1 seg
4,99 A	43 V	4,99 A	47 V	1 min
4,98 A	42 V	4,99 A	45 V	10 min
4,98 A	43 V	4,99 A	45V	30 min
4,98 A	44 V	4,99 A	45 V	45 min

El caudal promedio es 144 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	21,9	6,92	4,55	639	70,01	10	3,6	69	0,24	141
Salida	23,3	7,55	3,92	618	0,73	3	0,1	8	2,29	19

Tabla 7.66. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 5 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,43 y 4,65 cm

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$4,02 \times 10^6$	$1,8 \times 10^5$
Salida	$9,9 \times 10^3$	6

Tabla 7.67. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de aluminio

16 – 6 -2010

## ALUMINIO

El agua de entrada está bastante sucia.

Se fijan a 5 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
5,0 A	44 V	5,0 A	46 V	1 seg
4,99 A	44 V	4,99 A	45 V	inicio
4,99 A	43 V	4,99 A	45 V	10 min
4,99 A	43 V	4,99 A	44V	30 min
4,98 A	44 V	4,99 A	43 V	45 min

El caudal promedio es 139,17 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	20,7	6,80	5,43	642	20,6	7	2,1	37	010	65
Salida	21,4	7,54	4,25	613	1,15	4	0,0	10	2,95	19,5

Tabla 7.68. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 5 A el inicio

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$3,02 \times 10^6$	$2,4 \times 10^5$
Salida	$3,3 \times 10^3$	21

Tabla 7.69. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de aluminio

## HIERRO

El agua de entrada está bastante turbia.

## Distancia entre electrodos

1-3: 4,47; 4,60; 4,52; 4,54 = 4,53 cm

5-7: 4,65; 4,77; 4,88 = 4,766 cm

Se fijan a 5 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
5,0 A	41 V	5,0 A	43 V	1 seg
4,99 A	41 V	4,99 A	43 V	30 seg
4,99 A	40 V	4,99 A	42 V	1 min
4,98 A	39 V	4,99 A	39 V	10 min
4,98 A	39 V	4,99 A	39 V	30 min

El agua que sale del electrocoagulador es de color verdoso con muy poca espuma en la superficie y se observa una capa metálica de color verde oscuro ligeramente amarillo. Los flóculos se forman rápidamente.

El caudal promedio es 144,22 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	21,1	6,80	5,85	645	17,0	7	2,1	37	65
Salida	22,2	7,37	0,19	628	8,60	5	0,0	13	23

Tabla 7.70. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 5 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,53 y 4,77 cm

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$3,02 \times 10^6$	$2,4 \times 10^5$
Salida	$1,6 \times 10^3$	2

Tabla 7.71. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de hierro

17 – 06 – 2010

## HIERRO

El agua de entrada está bastante turbia.

### Distancia entre electrodos

1-3: 4,62; 4,70; 4,56; 4,55 = 4,61 cm

5-7: 4,87; 4,85; 4,80; 4,82; 4,82 = 4,83 cm

Se fijan a 3 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
2,98 A	25 V	2,99 A	26 V	inicio
2,98 A	24 V	2,99 A	25 V	8 min
2,98 A	24 V	2,99 A	25 V	10 min
2,98 A	24 V	2,99 A	24 V	17 min
2,98 A	23 V	2,99 A	24 V	32 min
2,98 A	23 V	2,99 A	23 V	40 min

A los 30 minutos de electrocoagulación se observa que el agua que sale del electrocoagulador era de color ligeramente verde, los flóculos se forman rápidamente y se agrupan para posteriormente precipitar.

El caudal promedio es 144,22 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	20,8	6,85	6,34	652	17,9	5	1,9	42	82,5
Salida	21,0	7,42	0,85	618	40,2	1	0,1	19	24

Tabla 7.72. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 3 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,61 y 4,83 cm

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$1,66 \times 10^6$	$2,6 \times 10^5$
Salida	Incontables	$7,2 \times 10^3$

Tabla 7.73. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de hierro

## ALUMINIO

El agua de entrada está bastante sucia.

Se fijan a 3 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
3,0 A	32 V	3,0 A	32 V	1 seg
2,98 A	27 V	2,99 A	29 V	inicio
2,98 A	26 V	2,99 A	27 V	10 min
2,98 A	25 V	2,99 A	27V	30 min
2,98 A	26 V	2,99 A	27 V	50 min

El caudal promedio es 139,17 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	22,1	6,92	6,37	662	17,9	5	1,9	42	0,09	82,5
Salida	22,0	7,88	4,29	628	1,41	3	0,0	11	2,08	22,5

Tabla 7.74. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 3 A el inicio

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$3,02 \times 10^6$	$2,4 \times 10^5$
Salida	$9,2 \times 10^3$	$8 \times 10^2$

Tabla 7.75. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de aluminio

Dureza total:

Entrada = 117 mg/l  $\text{CaCO}_3$

Salida Al = 101,5 mg/l  $\text{CaCO}_3$

Salida Fe = 112 mg/l  $\text{CaCO}_3$

21 – 6 – 2010

## ALUMINIO

El agua de entrada está bastante turbia.

Distancia entre electrodos

1-3: 4,74; 4,74; 4,76; 4,83 = 4,77 cm

3-5: 5,35; 5,05; 5,0; 5,0 = 5,1 cm

5-7: 4,84; 4,89; 4,89; 4,84 = 4,86 cm

Se fijan a 3 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
2,99 A	25 V	2,99 A	26 V	1 seg
2,99 A	24 V	2,99 A	25 V	inicio
2,98 A	24 V	2,99 A	25 V	10 min
2,98 A	24 V	2,98 A	25V	30 min
2,98 A	24 V	2,98 A	25 V	50 min

El caudal promedio es 135,00 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	22,0	6,99	6,22	688	20,8	10	1,8	43	0,15	83
Salida	22,4	7,78	4,06	683	1,58	6	0,0	8	1,6	7,5

Tabla 7.76. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 3 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,77, 5,1 y 4,86 cm

Dureza total:

Entrada = 117 mg/l CaCO<sub>3</sub>

Salida Al = 101,5 mg/l CaCO<sub>3</sub>

Salida Fe = 112 mg/l CaCO<sub>3</sub>

## HIERRO

El agua de entrada está bastante turbia con lodo.

Se fijan a 3 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
2,98 A	23 V	2,99 A	23 V	inicio
2,98 A	22 V	2,99 A	23 V	10 min
2,98 A	22 V	2,98 A	22 V	20 min
2,98 A	21 V	2,98 A	22 V	45 min

A los 30 minutos de electrocoagulación se observa que el agua que sale del electrocoagulador era de color amarillo verdoso, tardó en precipitar, la turbidez a las 24 horas era aún muy alta 20,1 NTU.

El caudal promedio es 142,27 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	22,8	7,16	3,42	708	66,9	21	3,6	109	134
Salida	22,9	8,30	0,55	682	44,3	5	0,1	22	33,5

Tabla 7.77. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 3 A el inicio



22 – 06 – 2010

## HIERRO

El agua de entrada está bastante turbia.

Distancia entre electrodos

1-3: 4,71; 4,66; 4,65 = 4,67 cm

3-5: 4,90; 4,98; 5,00 = 4,96

5-7: 4,74; 4,74; 4,72 = 4,73 cm

Se fijan a 3 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
2,99 A	24 V	2,99 A	24 V	inicio
2,98 A	22 V	2,99 A	23 V	10 min
2,98 A	21 V	2,98 A	22 V	30 min

El caudal promedio es 144,22 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	22,5	7,50	7,63	711	17,4	11,5	1,7	41	62
Salida	22,7	7,94	0,81	692	45,7	7	0,0	20	8

Tabla 7.78. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 3 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,67, 4,96 y 4,73 cm

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$2,17 \times 10^6$	$7,3 \times 10^5$
Salida	Incontables	Incontables

Tabla 7.79. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de hierro

## ALUMINIO

El agua de entrada está bastante turbia.

Se fijan a 3 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
2,98 A	27 V	2,99 A	29 V	1 seg
2,98 A	23 V	2,99 A	24 V	inicio
2,98 A	22 V	2,98 A	24 V	10 min
2,98 A	23 V	2,98 A	24 V	30 min
2,98 A	22 V	2,98 A	24 V	50 min

El caudal promedio es 135,00 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	23,7	7,49	6,97	724	17,4	11,5	1,7	41	0,15	62
Salida	24,1	8,25	4,09	721	2,40	7	0,0	12	1,6	8

Tabla 7.80. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 3 A el inicio

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$2,17 \times 10^6$	$7,3 \times 10^5$
Salida	$7,25 \times 10^3$	$5,3 \times 10^3$

Tabla 7.81. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de aluminio

23 – 06 – 2010

Incidencia, entra fango por la manguera, no se realiza la experimentación. Se coloca una alcachofa en la succión para evitar la entrada de fango y descebado de la tubería.

24 – 06 – 2010

Se comienza llenando el depósito de alimentación. Se fijan las intensidades de corriente en las fuentes de alimentación.

## ALUMINIO

F1		F2		Tiempo
6,98 A	45 V	7,00 A	47 V	inicio
6,98 A	45 V	6,99 A	46 V	10 min
6,98 A	45 V	6,99 A	46 V	20 min
6,98 A	45 V	6,99 A	46 V	30 min
6,98 A	46 V	6,99 A	45 V	40 min
6,98 A	46 V	6,99 A	45 V	50 min

El caudal promedio es 135,00 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	23,7	7,44	7,23	840	17,6	29,5	2,0	39	0,15	83,5
Salida	26,4	8,25	3,32	836	1,74	24	0,0	9	2,4	21,5

Tabla 7.82. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 7 A el inicio

Datos a la 1 hora del proceso de electrocoagulación.

## HIERRO

F1		F2		Tiempo
6,99 A	40 V	6,99 A	39 V	inicio
6,99 A	40 V	6,99 A	39 V	10 min
6,98 A	40 V	6,99 A	40 V	20 min
6,98 A	40 V	6,99 A	40 V	30 min
6,98 A	40 V	6,99 A	41 V	40 min
6,98 A	40 V	6,99 A	41 V	50 min

El agua que sale del electrocoagulador es de color verde oscuro, se observa una ligera capa de espuma, en la superficie tiene un brillo metálico. En el decantador el agua es de color verde oscuro con muchos flocúlos que decantan rápidamente. Pero hay partículas que quedan en el sobrenadante y en la pared del cono.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	24,7	7,43	6,25	866	17,6	29,5	2,0	39	83,5
Salida	26,9	8,51	0,2	888	7,0	23	0,0	10	27

Tabla 7.83. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 7 A el inicio

25 -06-2010

El agua estaba bastante sucia.

## HIERRO

F1		F2		Tiempo
0,98 A	6 V	0,98 A	7 V	inicio
0,98 A	7 V	0,98 A	7 V	10 min
0,98 A	7 V	0,98 A	7 V	20 min
0,98 A	7 V	0,98 A	7 V	30 min
0,98 A	7 V	0,98 A	7 V	40 min
0,98 A	7 V	0,98 A	7 V	50 min

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	23,8	7,40	6,55	874	17,0	34	2,3	35	88
Salida	23,9	8,00	4,61	867	60	31	1,3	43	55,5

Tabla 7.84. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 0,98 A el inicio

## ALUMINIO

Distancia entre electrodos:

1-3: 4,66; 4,55; 4,62; 4,58

5-7: 4,76; 4,78

F1		F2		Tiempo
0,98 A	8 V	0,98 A	8 V	inicio
0,98 A	8 V	0,98 A	8 V	10 min
0,98 A	8 V	0,98 A	8 V	20 min
0,98 A	8 V	0,98 A	8 V	30 min
0,98 A	8 V	0,98 A	8 V	40 min
0,98 A	8 V	0,98 A	8 V	50 min

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l	Al mg/l
Entrada	23,9	7,33	6,60	861	17,0	34	2,3	35	88	0,09
Salida	23,8	7,68	5,20	856	15,6	29	0,0	40	38,5	2,4 <sup>+</sup>

Tabla 7.85. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 0,98 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,60 y 4,77 cm

Dureza total:

Entrada = 111,1 mg/l CaCO<sub>3</sub>

Salida Al = 106 mg/l CaCO<sub>3</sub>

Salida Fe = 107 mg/l CaCO<sub>3</sub>

Dureza Cálcica:

Entrada = 36,8 mg/l Ca<sup>2+</sup>

Salida Al = 30 mg/l Ca<sup>2+</sup>

Salida Fe = 34,4 mg/l Ca<sup>2+</sup>

28 – junio – 2010

ALUMINIO 7<sup>a</sup>

Distancia entre electrodos:

1-3: 4,74; 4,76; 4,86

5-7: 4,68; 4,70; 4,83

F1		F2		Tiempo
6,98 A	54 V	6,99 A	54 V	inicio
6,98 A	54 V	6,99 A	54 V	10 min
6,98 A	54 V	6,99 A	54 V	20 min
6,98 A	54 V	6,99 A	53 V	30 min
6,98 A	54 V	6,99 A	53 V	40 min
6,98 A	54 V	6,99 A	53 V	50 min

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l	Al mg/l
Entrada	23,9	7,10	6,85	719	7,0	11	0,7	22	52,5	
Salida	27,4	8,23	3,46	706	0,62	9	0,1	12	20	

Tabla 7.86. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 7 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,79 y 4,77 cm

#### HIERRO 7ª

Distancia entre electrodos:

1-3: 4,64; 4,64; 4,72

5-7: 4,87; 4,78; 4,70

F1		F2		Tiempo
6,98 A	47 V	6,99 A	45 V	inicio
6,98 A	48 V	6,99 A	47 V	10 min
6,98 A	48 V	6,99 A	48 V	20 min
6,98 A	48 V	6,99 A	48 V	30 min
6,98 A	47 V	6,99 A	49 V	40 min
6,98 A	47 V	6,99 A	48 V	50 min

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l	Al mg/l
Entrada	24,7	7,16	6,72	723	7,0	11	0,7	22	52,5	
Salida	27,6	8,68	0,02	709	4,50	9	0,0	17	15,5	

Tabla 7.87. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 7 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,67 y 4,78 cm

Dureza total:

Entrada = 120 mg/l  $\text{CaCO}_3$

Salida Al = 99 mg/l  $\text{CaCO}_3$

Salida Fe = 99 mg/l  $\text{CaCO}_3$

Dureza Cálcica:

Entrada = 38 mg/l  $\text{Ca}^{2+}$

Salida Al = 26,8 mg/l  $\text{Ca}^{2+}$

Salida Fe = 30 mg/l  $\text{Ca}^{2+}$

Microbiológico:

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$1,98 \times 10^6$	$3,5 \times 10^5$
Salida Al	$3,85 \times 10^3$	33
Salida Fe	50	10

Tabla 7.88. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de hierro

29-JUNIO-2010

HIERRO 9ª

Distancia entre electrodos:



1-3: 4,67; 4,60; 4,68

5-7: 4,76; 4,89; 4,76

F1		F2		Tiempo
9,00 A	55 V	9,00 A	54 V	inicio
8,99 A	55 V	9,00 A	55 V	10 min
8,99 A	55 V	8,99 A	56 V	20 min
8,99 A	55 V	8,99 A	56 V	30 min
8,99 A	55 V	8,99 A	57 V	40 min
8,99 A	55 V	8,99 A	57 V	50 min

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l	Al mg/l
Entrada	24,3	7,35	5,76	803	7,95	19	1,0	31	63,5	
Salida	28,7	8,88	0,00	803	4,44	18	0,0	10	14	

Tabla 7.89. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 9 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,65 y 4,80 cm

#### ALUMINIO 9ª

Distancia entre electrodos:

1-3: 4,74; 4,74; 4,69

5-7: 5,40; 5,12; 4,98

F1		F2		Tiempo
9,00 A	58 V	8,99 A	60 V	inicio
8,99 A	58 V	8,99 A	59 V	10 min
8,99 A	58 V	8,99 A	60 V	20 min
8,99 A	58 V	8,99 A	59 V	30 min
8,99 A	58 V	8,99 A	58 V	40 min
8,99 A	57 V	8,99 A	58 V	50 min

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l	Al mg/l
Entrada	25,1	7,37	5,91	811	7,95	19	1,0	31	63,5	
Salida	30,0	8,78	3,49	805	1,14	15	0,0	11	19	

Tabla 7.90. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 9 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,72 y 5,16 cm

Dureza total:

Entrada = 112 mg/l  $\text{CaCO}_3$

Salida Al = 87 mg/l  $\text{CaCO}_3$

Salida Fe = 93 mg/l  $\text{CaCO}_3$

Dureza Cálcica:

Entrada = 37,4 mg/l  $\text{Ca}^{2+}$

Salida Al = 23,6 mg/l  $\text{Ca}^{2+}$

Salida Fe = 32 mg/l  $\text{Ca}^{2+}$

Microbiológico:

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$2,81 \times 10^6$	$5,5 \times 10^5$
Salida Al	166	11
Salida Fe	116	6

Tabla 7.91. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de aluminio

30-JUNIO-2010

ALUMINIO 9ª

Distancia entre electrodos:

1-3: 4,75; 4,77; 4,78

5-7: 4,79; 4,78; 4,73

F1		F2		Tiempo
8,99 A	61 V	8,99 A	62 V	inicio
8,98 A	61 V	8,99 A	61 V	10 min
8,98 A	61 V	8,99 A	61 V	20 min
8,98 A	62 V	8,99 A	60 V	30 min
8,98 A	62 V	8,99 A	60 V	40 min
8,98 A	63 V	8,99 A	59 V	50 min

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l	Al mg/l
Entrada	24,8	7,24	6,21	784	8,5	21,5	1,05	31	75,5	
Salida	29,8	8,53	3,26	782	0,85	17	0,0	11	18	

Tabla 7.92. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 9 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,77 y 4,77 cm

### HIERRO 9ª

Distancia entre electrodos:

1-3: 4,72; 4,73; 4,71

5-7: 4,8; 4,72; 4,84

F1		F2		Tiempo
9,00 A	56 V	8,99 A	53 V	inicio
9,00 A	56 V	8,99 A	54 V	10 min
8,99 A	56 V	8,99 A	55 V	20 min
8,99 A	56 V	8,99 A	55 V	30 min
8,99 A	57 V	8,99 A	56 V	40 min
8,99 A	56 V	8,99 A	55 V	50 min

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l	Al mg/l
Entrada	25,7	7,31	6,05	787	8,5	21,5	1,05	31	75,5	
Salida	29,9	9,26	0,05	790	6,58	16	0,0	12	20	

Tabla 7.93. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 9 A el inicio y con distancia entre electrodos de 4,72 y 4,78 cm

Dureza total:

Entrada = 118 mg/l  $\text{CaCO}_3$

Salida Al = 79,5 mg/l  $\text{CaCO}_3$

Salida Fe = 95,5 mg/l  $\text{CaCO}_3$

Dureza Cálcica:

Entrada = 35,8 mg/l  $\text{Ca}^{2+}$

Salida Al = 26,6 mg/l  $\text{Ca}^{2+}$

Salida Fe = 29,2 mg/l  $\text{Ca}^{2+}$

Microbiológico:

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$1,95 \times 10^6$	$6,3 \times 10^5$
Salida Al	$4,2 \times 10^3$	44
Salida Fe	54	3

Tabla 7.94. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de hierro

1 – JULIO – 2010

ALUMINIO 9A SIN PLACA INTERMEDIA

Distancia entre electrodos:

---

Procesos avanzados de tratamiento y depuración de las aguas mediante electrocoagulación

1-2: 4,64; 4,65; 4,64

3-4: 4,60; 4,66; 4,64

F1		F2		Tiempo
8,99 A	61 V	8,99 A	60 V	inicio
8,98 A	61 V	8,99 A	60 V	10 min
8,98 A	60 V	8,99 A	59 V	20 min
8,98 A	59 V	8,99 A	59 V	30 min
8,98 A	59 V	8,99 A	59 V	40 min
8,98 A	59 V	8,99 A	59 V	50 min

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l	Al mg/l
Entrada	25,3	7,12	6,02	788	7,6	20	1,3	36	69,5	
Salida	29,5	7,98	3,85	823	1,77	19	0,0	1	24,5	

Tabla 7.95. Resultados obtenidos con nuevas placas de aluminio fijando en 9 A sin placa intermedia en el inicio y con distancia entre electrodos de 4,64 y 4,63 cm

#### HIERRO 9A SIN PLACA INTERMEDIA

Distancia entre electrodos:

1-2: 4,55; 4,48; 4,48

3-4: 4,56; 4,55; 4,55

F1		F2		Tiempo
8,99 A	55 V	8,99 A	53 V	inicio
8,98 A	55 V	8,99 A	52 V	10 min
8,98 A	55 V	8,99 A	52 V	20 min
8,98 A	55 V	8,99 A	52 V	30 min
8,98 A	55 V	8,99 A	52 V	40 min
8,98 A	55 V	8,99 A	52 V	50 min

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l	Al mg/l
Entrada	26,1	7,16	6,14	797	7,6	20	1,3	36	69,5	
Salida	29,8	7,95	0,08	831	22,6	15	0,1	23	22,5	

Tabla 7.96. Resultados obtenidos con nuevas placas de hierro fijando en 9 A sin placa intermedia en el inicio y con distancia entre electrodos de 4,50 y 4,55 cm

Dureza total:

Entrada = 106 mg/l  $\text{CaCO}_3$

Salida Al = 92 mg/l  $\text{CaCO}_3$

Salida Fe = 96 mg/l  $\text{CaCO}_3$

Dureza Cálcica:

Entrada = 34,4 mg/l  $\text{Ca}^{2+}$

Salida Al = 28,8 mg/l  $\text{Ca}^{2+}$

Salida Fe = 30,4 mg/l  $\text{Ca}^{2+}$

Microbiológico:

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$2,67 \times 10^6$	$9,4 \times 10^5$
Salida Al	$2,08 \times 10^4$	$6,5 \times 10^3$
Salida Fe	$7,3 \times 10^3$	59

Tabla 7.97. Resultados obtenidos de parámetros microbiológicos con nuevas placas de hierro

### 7.4.2. Presentación y análisis de resultados

En relación al cumplimiento de los sistemas de electrocoagulación con las normativas actuales de reutilización.(Objetivos 3.1.1 y 3.1.2)

**A) Resultados, utilizando electrodos de aluminio y hierro con placa conductora intermedia. Referentes a los parámetros fisicoquímicos como son: SS, turbidez, nitrógeno y fósforo**

Experimentación con electrodos de aluminio

En la siguiente tabla y gráfico siguientes se muestran los rendimientos promedio obtenidos en la eliminación de la DQO, SST, P-total, N-total, y turbidez. Se puede observar que los mayores rendimientos se obtienen a intensidades de entre 3 y 7 amperios.

A (amperios)	A/m <sup>2</sup>	DQO (%)	SST (%)	P-Total (%)	N-Total (%)	Turbidez (%)
1	6,11	56,3	0	100	14,7	8,2
3	18,34	83,6	75,3	100	39,7	90,2
5	30,56	74,5	75,6	99,1	54,3	95,5
7	42,79	67,9	61,2	92,9	18,4	90,6
9	55,01	72,5	64,5	100	21,3	87,8

Tabla 7.98. Rendimiento de eliminación (%) usando electrodos de Al con placa intermedia.

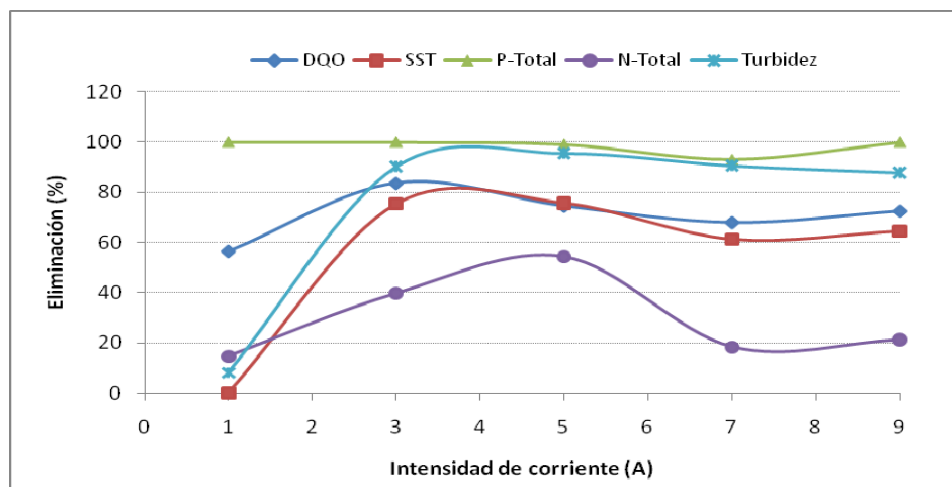


Figura 7.51. Rendimiento de eliminación de contaminantes a diferentes intensidades de corriente

En relación al fósforo total, se puede decir que la eliminación ha sido prácticamente del 100% en todos los casos.

Para el caso de P-total, la norma fija un máximo de 2 mg/l, mientras que en el agua obtenida en la presente investigación muy pocas veces superó 0,1 mg/l.

En el caso de la DQO, se obtuvo un rendimiento global por encima del 50%, llegando a una eliminación mayor del 80% a 3 A y 23 V. El rango de pH del agua residual tratada que servía de alimentación a la planta piloto variaba de entre 6,5 a 7,5, motivo por el cual no fue necesario ajustar el pH. El agua tratada salía con un ligero aumento del pH; solamente cuando se trabajó a 9 A y 58 V el pH se incrementó a 8,7. Según Bard et al., en el rango de pH 4-9 hay mayor formación del  $\text{Al}(\text{OH})_3$  amorfo, que elimina la DQO soluble por el mecanismo de adsorción (Chen et al., 2000).

En cuanto a los SST, se puede observar que a 1 A y 8 V la cantidad de  $\text{Al}^{3+}$  generado (0,0023 g/l de Al) no fue suficiente para coagular y se observó que en el líquido clarificado quedaban pequeñas partículas que no llegaban a sedimentar lo cual incrementó el resultado final de los sólidos suspendidos. En cambio, a partir de 3 A con 28 V, y 5 A con 48 V, se alcanzó un rendimiento del 75%. Sin embargo a partir de 7 A el rendimiento ha bajado ligeramente debido, posiblemente, al exceso de aluminio generado (más de 0,0086 gr de Al) y que ha quedado en el clarificado en forma de compuestos solubles formando pequeñas partículas que no precipitaron. En general, a partir de los 3 A, se obtuvo una reducción de los SST en promedio de 37,77 mg/l hasta 9,77 mg/l. Lo que le hace válida su reutilización para usos urbanos de calidad 1.1 Residencial: riego de jardines privados y descarga de aparatos sanitarios, cuyo límite es de 10 mg/l de SS.

También se ha podido observar que el tiempo de sedimentación es clave para conseguir una buena eliminación de la turbidez y de los SS. El rendimiento alcanzado en la eliminación de la turbidez fue más del 90% a partir de 3 A. Con estas intensidades de corriente se alcanzó una reducción, en promedio, de 12,2 NTU hasta 1,09 NTU que se considera apta para la reutilización del agua tratada para usos urbanos de calidad 1.1 Residencial: riego de jardines privados y descarga de aparatos sanitarios, cuyo límite es de 2 NTU.



En cuanto al nitrógeno total, se alcanzó un ligero rendimiento del 39 % a 3 A y del 54% a 5 A. Por debajo o por encima de esas intensidades de corriente el rendimiento fue bajo. Posiblemente debido a esas intensidades el potencial generado en la celda es adecuado para reducir los nitrógenos presentes en el agua a formas de  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{N}_2$  o  $\text{NH}_3$ .

Según la normativa de reutilización de las aguas según sus usos, el agua obtenida con intensidades de corriente a partir de 3 A se considera apta para todos los usos que menciona la norma, excepto para usos industriales: calidad 3.2 torres de refrigeración y condensadores evaporativos, que se requiere 5 mg/l como máximo en SS.

Conclusiones:

Las características eléctricas de los ensayos se definen en el siguiente cuadro.

Al	9 A, 58 V	7 A, 54 V	5 A, 45 V	3 A, 27 V	1 A, 8 V
Fe	9 A, 56 V	7 A, 48 V	5 A, 40 V	3 A, 23 V	1 A, 7 V

Tabla 7.99. Rendimiento de eliminación (%) usando electrodos de Al con placa intermedia.

- C-64 Con electrodos de aluminio y placas de acero interpuestas, y en relación al fósforo total, se puede decir que la eliminación ha sido prácticamente del 100% en todos los casos. Intensidad de corriente entre 3 y 9 A.
- C-65 Con electrodos de aluminio y placas de acero interpuestas, se justifica el sistema como un buen método para la reutilización de aguas, saliendo del secundario de una depuradora. Turbidez inferior a 0,1 NTU.
- C-66 Con electrodos de aluminio y placa intermedia sin corriente, y en el caso de la DQO, se obtuvo un rendimiento global por encima del 50%, y por encima del 70% para intensidades entre 2 y 9 A, llegando a una eliminación mayor del 80% a 3 A y 23 V. El rango de pH del agua residual tratada que servía de alimentación a la planta piloto variaba de entre 6,5 a 7,5, motivo por el cual no fue necesario ajustar el pH. El agua tratada salía con un ligero aumento del pH; solamente cuando se trabajó a 9 A y 58 V el pH se incrementó a 8,7.

- C-67 Con electrodos de aluminio y placa intermedia sin corriente, en cuanto a los SST, se puede observar que a 1 A y 8 V la cantidad de  $Al^{3+}$  generado (0,0023 g/l de Al) no fue suficiente para coagular y se observó que, en el líquido clarificado, quedaban pequeñas partículas que no llegaban a sedimentar, lo cual incrementó el resultado final de los sólidos suspendidos.
- C-68 Con electrodos de aluminio y placa intermedia sin corriente, en cuanto a los SST, a partir de 7 A el rendimiento ha bajado ligeramente, debido, posiblemente, al exceso de aluminio generado (más de 0,0086 gr de Al), quedando en el clarificado pequeños flóculos, formando pequeñas partículas que no precipitaron.
- C-69 Con electrodos de aluminio y placa intermedia sin corriente, en general, a partir de los 3 A, se obtuvo una reducción de los SST en promedio de 37,77 mg/l hasta 9,77 mg/l. Lo que le hace válida su reutilización para usos urbanos de calidad 1.1 Residencial: riego de jardines privados y descarga de aparatos sanitarios, cuyo límite es de 10 mg/l de SS.
- C-70 Con electrodos de aluminio y placa intermedia sin corriente, en cuanto al nitrógeno total, se alcanzó un ligero rendimiento del 39 % a 3 A y del 54% a 5 A. Por debajo o por encima de esas intensidades de corriente, el rendimiento fue bajo. Posiblemente debido a esas intensidades el potencial generado en la celda es adecuado para reducir los nitrógenos presentes en el agua a formas de  $NO_2^-$ ,  $N_2$  o  $NH_3$ .
- C-71 Con electrodos de aluminio y placa intermedia sin corriente, según la normativa de reutilización de las aguas según sus usos, el agua obtenida con intensidades de corriente a partir de 3 A se considera apta para todos los usos que menciona la norma, excepto para usos industriales: calidad 3.2 torres de refrigeración y condensadores evaporativos, que se requiere 5 mg/l como máximo en SS.

#### Experimentación con electrodos de hierro

La tabla y gráfico siguientes se muestran los rendimientos promedios alcanzados utilizando electrodos de hierro (Fe) con placa intermedia del mismo material.

A (amperios)	A/m <sup>2</sup>	DQO (%)	SST (%)	P-Total (%)	N-Total (%)	Turbidez (%)
1	6,11	36,9	0,0	43,5	8,8	0,0
3	18,34	77,7	61,9	97,3	65,1	0,0
5	30,56	68,6	69,5	98	49,5	21,7
7	42,79	68,9	48,5	100	20,1	48,0
9	55,01	74,4	64,5	100	15,3	45,1

Tabla 7.100. Rendimiento de eliminación (%) usando electrodos de Fe con placa intermedia.

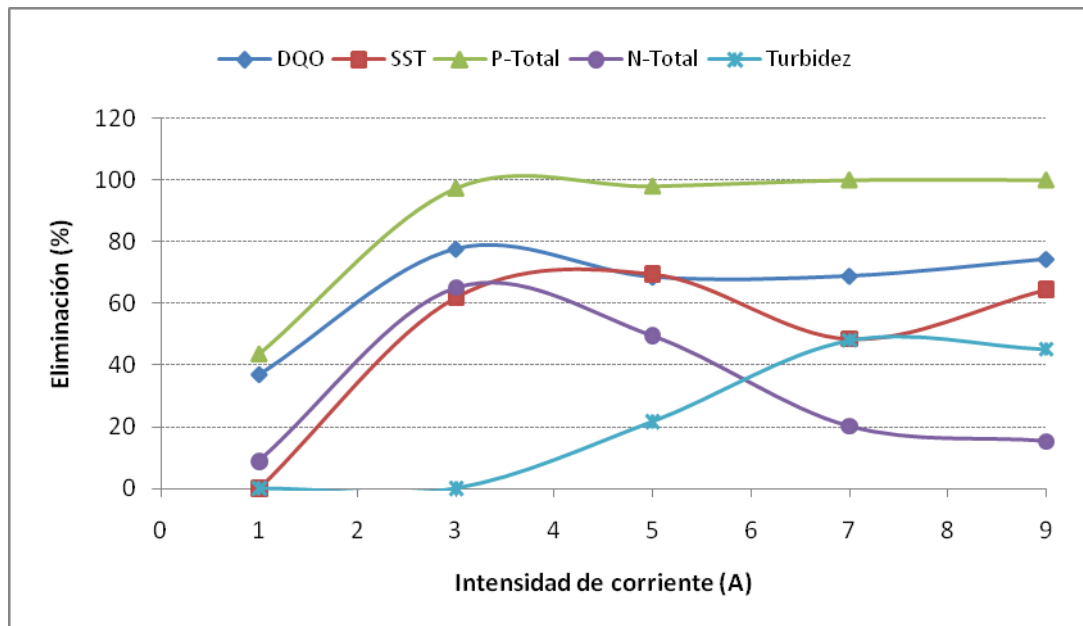


Figura 7.52. Rendimiento promedio de eliminación de contaminantes a diferentes intensidades de corriente.

En relación al fósforo total, se puede decir que la eliminación ha sido prácticamente del 100 % a partir de 3 A de intensidad de corriente.

También, para la DQO, a partir 3 A, se obtuvieron buenos rendimientos, alrededor del 70%, llegando a una eliminación del 77% a 3 A y 22 V. En el agua tratada, la DQO ha variado desde un máximo de 34 mg/l a un mínimo de 10 mg/l. Mientras que en el agua de entrada ha variado, durante la experimentación, desde un máximo de 141 a un mínimo de 26 mg/l.

Se observó que, cuando se trabajó a 3 A, el agua que salía de la celda de electrocoagulación era de color verde, es decir, que el hierro presente en la solución estaba en estado ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) soluble, pero, al cabo de un tiempo el agua del decantador se tornaba de color naranja oscuro, es decir que el Fe II pasaba a Fe III por acción del oxígeno del aire, formándose los hidróxidos

insolubles y quedaban en el agua partículas muy pequeñas que no decantaban y fueron los responsables de la turbidez y el incremento de los SS en el clarificado. Cuando se trabajó a 1 A agua de salida era de color naranja oscuro, que tardaba mucho tiempo en decantar, pero siempre el clarificado presentaba un color naranja, observándose abundantes partículas muy pequeñas en el sobrenadante, que son responsables del incremento de los SST y la turbidez. Mientras que a partir de 5 A, el agua de salida era de color verde oscuro y se formaban muy rápidamente los coágulos, es decir, las partículas se agrupaban casi de inmediato y precipitaban dejando un clarificado ligeramente verdoso que con el tiempo se ponía de color naranja. El precipitado permanecía por un tiempo más prolongado con su coloración verdosa y con el tiempo la superficie que estaba en contacto con el agua se tornaba de color marrón naranja y el del fondo era verde oscuro. Según Bukhari A., 2008, postula que la eliminación de los contaminantes, cuando en la solución está el hierro en estado ferroso ( $Fe^{2+}$ ) es por el mecanismo de neutralización.

En cuanto a los SST, se pudo observar que a partir de 3 A con 22 V, se alcanzó un rendimiento por encima del 60%, con un promedio de 16 mg/l de SS, en salida, a lo largo de la experimentación.

También se ha podido observar que el tiempo de sedimentación, cuando se trabajó con electrodos de hierro, era prolongado para conseguir una buena eliminación de la turbidez y de los SS. Cabe recordar que los análisis se han realizado con un tiempo de sedimentación de entre 30 minutos a una hora.

El rendimiento alcanzado en la eliminación de la turbidez fue cercano al 50%, más a partir de 7 A. A partir de estas intensidades de corriente se alcanzó 4,5 NTU. Según la normativa de reutilización de las aguas según sus usos, el agua obtenida con intensidades de corriente a partir de 5 A, se considera apta para todos los usos que menciona la norma excepto para: Usos urbanos: calidad residencial, usos industriales: calidad 3.2 torres de refrigeración y condensadores evaporativos; usos ambientales: calidad 5.2 recarga de acuíferos por inyección directa.

En cuanto al nitrógeno total, se alcanzó un ligero rendimiento del 65 % a 3 A y del 49% a 5 A. Por debajo o por encima de esas intensidades de corriente el rendimiento fue bajo.

---

### Conclusiones:

- C-72 Con electrodos de hierro y placas de acero interpuestas, y en relación al fósforo total, se puede decir que la eliminación ha sido prácticamente del 100% en todos los casos. Intensidad de corriente entre 3 y 9 A.
- C-73 Con electrodos de hierro y placas de acero interpuestas, para la DQO, a partir 3 A, se obtuvieron buenos rendimientos, alrededor del 70%, llegando a una eliminación del 77% a 3 A y 22 V. En el agua tratada, la DQO ha variado desde un máximo de 34 mg/l a un mínimo de 10 mg/l. Mientras que en el agua de entrada ha variado, durante la experimentación, desde un máximo de 141 a un mínimo de 26 mg/l.
- C-74 Con electrodos de hierro y placas de acero interpuestas, en cuanto a los SST, se puede observar que a partir de 3 A con 22 V, se alcanzó un rendimiento por encima del 60%, con un promedio de 16 mg/l de SS, en salida.
- C-75 Con electrodos de hierro y placas de acero interpuestas, tiene importancia, igual que en el caso anterior con aluminio, el tiempo de sedimentación, que se recomienda superior a 1 hora.
- C-76 Con electrodos de hierro y placas de acero interpuestas, a partir de 7 A. de intensidad de corriente, se alcanzaron rendimientos superiores al 42%, con una turbidez en salida inferior a 4,5 NTU. Según la normativa de reutilización de las aguas, y según sus usos, el agua obtenida con intensidades de corriente a partir de 5 A, se considera apta para todos los usos que menciona la norma excepto para: Usos urbanos: calidad residencial, usos industriales: calidad 3.2 torres de refrigeración y condensadores evaporativos; usos ambientales: calidad 5.2 recarga de acuíferos por inyección directa.
- C-77 Con electrodos de hierro y placas de acero interpuestas, en cuanto al nitrógeno total, se alcanzó un rendimiento interesante entre los 2 y 5 A. Rendimientos del del 65 % a 3 A y del 49% a 5 A. Por debajo o por encima de esas intensidades de corriente el rendimiento fue bajo.

### Comparación de rendimientos entre placas de aluminio y hierro con placas de acero interpuestas, sin corriente.

En el gráfico siguiente, se muestran la comparación del rendimiento de eliminación de la DQO entre electrodos de Fe y Al.

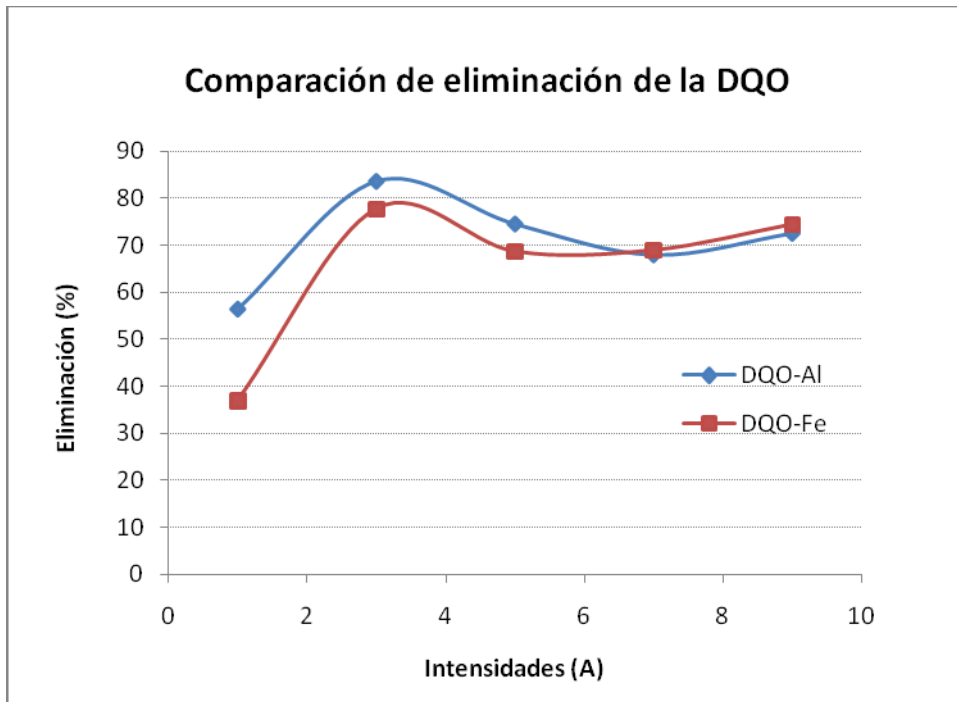


Figura 7.53. Comparación de eliminación de la DQO con electrodos de aluminio y hierro

C-78 En la comparación de rendimientos entre placas de aluminio y hierro con placas de acero interpuestas, sin corriente, pueden darse las siguientes conclusiones:

1. En relación con la DQO, a intensidades inferiores a 7 A, con electrodos de aluminio se obtienen mayores rendimientos.
2. En relación con los SST, a intensidades inferiores a 9 A, con electrodos de aluminio se obtienen mayores rendimientos.
3. En relación con la turbidez, siempre, con electrodos de aluminio se obtienen mayores rendimientos.
4. En relación con el P, a intensidades superiores a 3 A, con electrodos de aluminio o de hierro se obtienen rendimientos próximos al 100%.
5. En relación con el N, a intensidades inferiores a 5 A, con electrodos de hierro se obtienen mayores rendimientos. De 5 a 10 A, los rendimientos son similares para el aluminio y el hierro.

En el gráfico siguiente, se muestran una comparación de los rendimientos obtenidos en la eliminación de los SST y turbidez entre electrodos de hierro y aluminio.

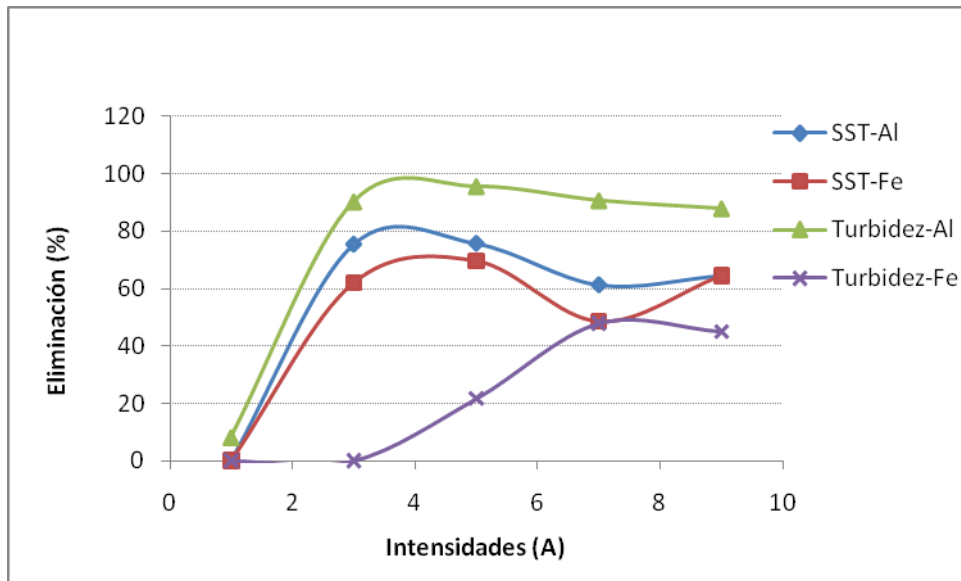


Figura 7.54. Comparación de eliminación de SST y turbidez con electrodos de aluminio y hierro

En el gráfico siguiente, se muestran una comparación de los rendimientos obtenidos en la eliminación del fósforo total y del nitrógeno total entre electrodos de hierro y aluminio.

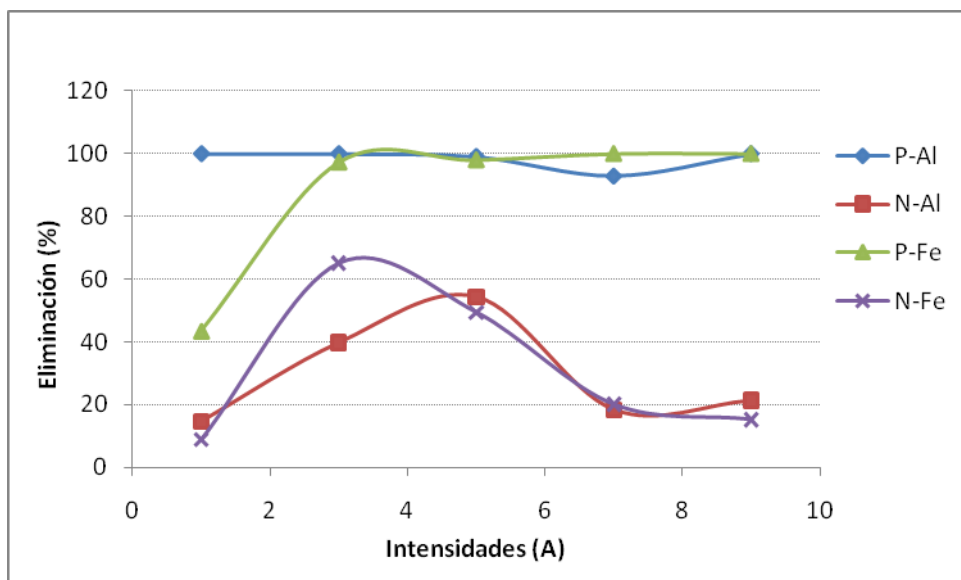


Figura 7.55. Comparación de eliminación del P-total y N-total con electrodos de aluminio y hierro

- Resultados en la eliminación de microorganismos

Amperios	Entrada (UFC/100 ml)	Salida Al (UFC/100 ml)	Salida Fe (UFC/100 ml)
1	2,70E+06	1,60E+04	3,70E+05
3	1,92E+06	8,23E+03	2,00E+05
5	3,12E+06	4,97E+03	1,29E+03
7	1,98E+06	3,85E+03	5,00E+01
9	2,38E+06	2,18E+03	8,50E+01

Tabla 7.101. Resultados promedios de Coliformes totales en el agua de entrada y a la salida de las celdas de aluminio y la de hierro.

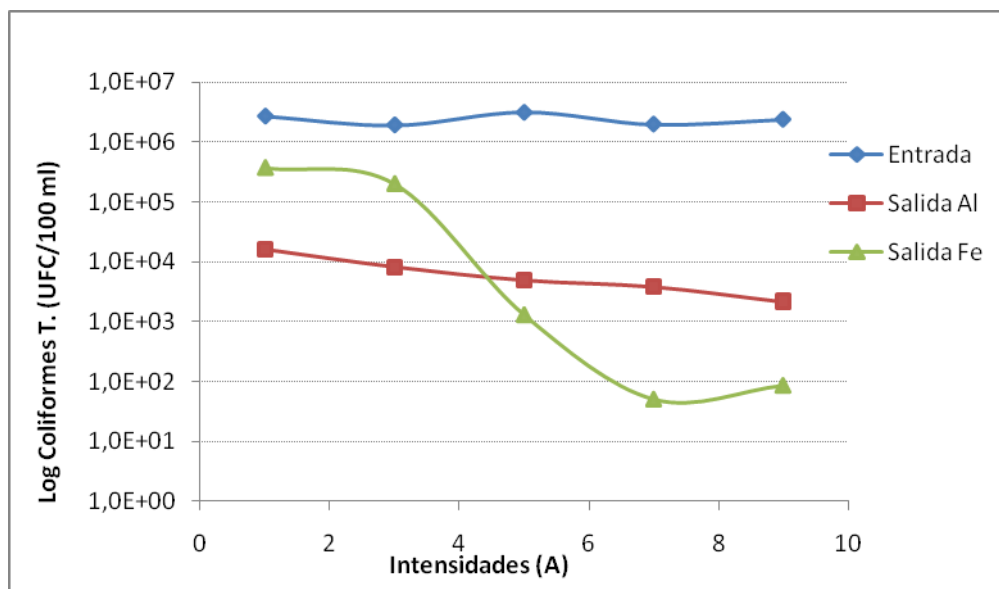


Figura 7.56. Eliminación de coliformes T., con electrodos de aluminio y hierro

Como se puede observar en la tabla y gráfico siguientes, se alcanza una importante reducción de los *coliformes totales* a partir de 5 A. Para el caso de la celda conteniendo electrodos de aluminio se alcanza una eliminación de 3 décadas logarítmicas, lo que equivale a más de un 99,8%. Para el caso de la celda de hierro se alcanzó una reducción de 5 décadas logarítmicas a partir de 7 A, lo que equivale a más de un 99,99% de eliminación.



Amperios	Entrada (UCF/100 ml)	Salida Al (UCF/100 ml)	Salida Fe (UCF/100 ml)
1	3,20E+05	1,20E+04	2,15E+04
3	4,95E+05	2,66E+03	7,20E+03
5	1,49E+05	1,03E+01	2,00E+00
7	3,50E+05	3,30E+01	1,00E+01
9	5,90E+05	2,71E+01	4,50E+00

Tabla 7.102. Resultados promedios de *E. Coli* en el agua de entrada y a la salida de la celda de aluminio y la de hierro.

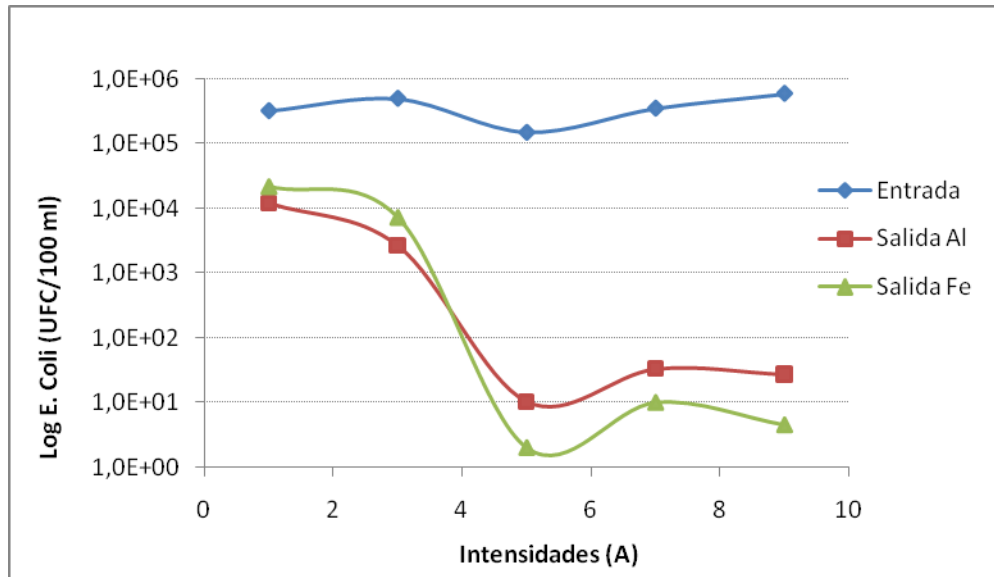


Figura 7.57. Eliminación de *E. Coli*, con electrodos de aluminio y hierro

La tabla y gráfico siguientes muestran los rendimientos obtenidos en la eliminación de *E. Coli* en la presente investigación utilizando electrodos de aluminio y hierro con placa intermedia entre electrodos. Se puede observar que a partir de 5 A, se logra una reducción de 5 décadas logarítmicas.

Según la normativa de reutilización, exigida por el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (BOE nº 294, 08/12/2007), el agua obtenida mediante el proceso de electrocoagulación usando ambos electrodos, a partir de 5 A cumplen los requisitos exigidos por la norma para todos los usos, excepto para: Usos urbanos calidad 1.1: Residencial que fija un valor máximo admisible de *E. Coli* de 0 UFC/ 100 ml. Usos industriales, calidad 3.2: Torres de refrigeración y condensadores evaporativos, que fija ausencia de UFC/100 ml. Usos ambientales, calidad 5.2: recarga de acuíferos que fija en 0 UFC/100 ml.

En las siguientes tablas se pueden observar con mayor detalle la comparación de los resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio y hierro con placa intermedia, a diferentes intensidades de corriente.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	24,3	7,35	5,76	811	7,95	19	1,0	31	63,5
Salida	30,0	8,78	3,49	805	1,14	15	0,0	11	19

Tabla 7.103. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de Aluminio a 9 A y 58 V

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	24,3	7,35	5,76	811	7,95	19	1,0	31	63,5
Salida	28,7	8,88	0,05	803	4,44	18	0,0	10	14

Tabla 7.104. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de hierro 9 A y 56 V.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	23,9	7,10	6,85	719	7,0	11	0,7	22	52,5
Salida	27,4	8,23	3,46	706	0,62	9	0,1	12	20

Tabla 7.105. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio 7 A y 54 V.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	23,9	7,10	6,85	719	7,0	11	0,7	22	52,5
Salida	27,6	8,68	0,02	709	4,50	9	0,0	17	15,5

Tabla 7.106. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de hierro 7 A y 48 V.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	21,5	6,58	4,41	614	10,1	6	1,7	26	60,5
Salida	23,0	7,19	4,76	588	0,71	3	0,0	9	20

Tabla 7.107. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio 5 A y 45 V.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	21,5	6,58	4,41	614	10,1	6	1,7	26	60,5
Salida	22,9	7,58	0,10	610	17,5	3	0,1	12	26

Tabla 7.108. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de hierro 5 A y 40 V.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	20,8	6,85	6,34	662	17,9	5	1,9	42	82,5
Salida	21,4	7,70	4,29	628	1,41	3	0,0	11	22,5

Tabla 7.109. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio 3 A y 27 V.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	20,8	6,85	6,34	662	17,9	5	1,9	42	82,5
Salida	21,0	7,42	0,85	618	40,2	1	0,1	19	24

Tabla 7.110. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de hierro 3 A y 23 V.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	23,9	7,33	6,60	861	17,0	34	2,3	35	88
Salida	23,9	7,68	5,20	856	15,6	29	0,0	40	38,5

Tabla 7.111. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio 1 A y 8 V.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	23,9	7,33	6,60	861	17,0	34	2,3	35	88
Salida	23,9	8,00	4,61	854	60	31	1,3	43	55,5

Tabla 7.112. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de hierro 1 A y 7 V.

- C-79 Con electrodos de aluminio, y placas de acero interpuestas, en cuanto a la reducción de coliformes totales, se alcanza una importante reducción de los *coliformes totales* a partir de 5 A. Para el caso de la celda conteniendo electrodos de aluminio se alcanza una eliminación de 3 décadas logarítmicas, lo que equivale a más de un 99,8%. Para el caso de la celda de hierro se alcanzó una reducción de 5 décadas logarítmicas a partir de 7 A, lo que equivale a más de un 99,99% de eliminación.
- C-80 Con electrodos de aluminio, y placas de acero interpuestas, en cuanto a la reducción de E. coli, a partir de 5 A, se logra una reducción de 5 décadas logarítmicas.
- C-81 Con electrodos de aluminio, y placas de acero interpuestas, según la normativa de reutilización, exigida por el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (BOE nº 294, 08/12/2007), el agua obtenida mediante el proceso de electrocoagulación usando ambos electrodos, a partir de 5 A cumplen los requisitos exigidos por la norma para todos los usos, excepto para: Usos urbanos calidad 1.1: Residencial que fija un valor máximo admisible de E. Coli de 0 UFC/ 100 ml. Usos industriales, calidad 3.2: Torres de

refrigeración y condensadores evaporativos, que fija ausencia de UFC/100 ml. Usos ambientales, calidad 5.2: recarga de acuíferos que fija en 0 UFC/100 ml.

**B) Resultados, utilizando electrodos de aluminio y hierro sin placa conductora intermedia. Referentes a los parámetros fisicoquímicos como son: SS, turbidez, nitrógeno y fósforo**

Experimentación con electrodos de aluminio

Las características eléctricas de los ensayos se definen en el siguiente cuadro.

Al	9 A, 58 V	7 A, 53 V	5 A, 33 V	3 A, 21 V	1 A, 9 V
Fe	9 A, 53 V	7 A, 46 V	5 A, 30 V	3 A, 19 V	1 A, 7 V

Tabla 7.113. Características de los ensayos

Como se puede observar en la tabla y gráfico siguientes, el grado de eliminación de la DQO estuvo por encima del 61% en todos los rangos de intensidades de corriente experimentados. Cabe señalar que, en las investigaciones a nivel laboratorio y por lotes no se habían alcanzado estos rendimientos.

Mientras que la eliminación del fósforo era casi total. Para el caso de P-total la norma fija un máximo de 2 mg/l, mientras que en el agua obtenida en la presente investigación muy pocas veces superó 0,1 mg/l.

La eliminación del nitrógeno fue moderado, y algunas veces bastante pobre.

La eliminación de los SST también fue buena, por encima del 50%.

Según la normativa de reutilización de las aguas, dependiendo de sus usos, el agua obtenida, con intensidades de corriente a partir de 1 A, alcanzó una reducción de la turbidez superior al 80%, quedando en valores inferiores a 2 NTU, siendo apta para la reutilización del agua tratada para usos urbanos, calidad 1.1 Residencial: riego de jardines privados y descarga de aparatos sanitarios, cuyo límite es de 2 NTU. En cuanto a los SS se considera apta para todos los usos que

menciona la norma, excepto para: Usos urbanos calidad 1.1 residencial, que fija un valor máximo de 10 mg/l en SS. Pero trabajando con 7 y 9 A, sí se ha alcanzado dicho criterio de calidad.

A (amperios)	DQO (%)	SST (%)	P-Total (%)	N-Total (%)	Turbidez (%)
1	61,5	65,7	92,3	50	81,6
3	61,7	59,1	92,6	10	84,6
5	64,8	48,5	97,2	18,6	83,1
7	80,6	78,3	100	43,2	94,3
9	70,4	84,5	100	12	86,8

Tabla 7.114. Rendimientos de eliminación obtenidos trabajando con electrodos de aluminio sin placa intermedia.

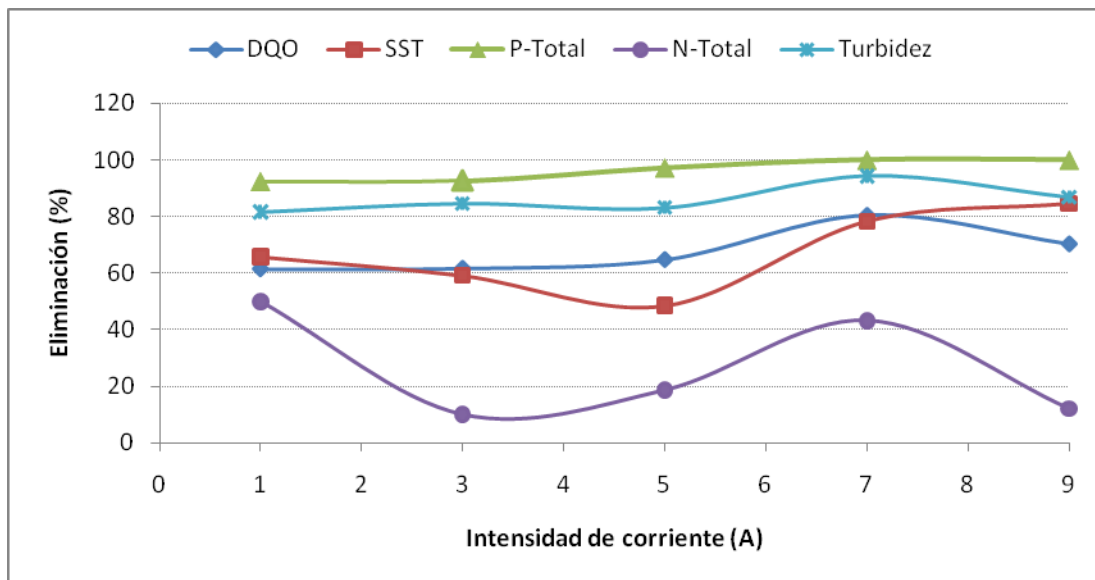


Figura 7.58. Eliminación de la DQO, P-total, N-total, SS, y Turbidez con electrodos de aluminio

#### Conclusiones:

- C-82 Con electrodos de aluminio, sin placas interpuestas, y en relación al fósforo total, se puede decir que la eliminación ha sido prácticamente del 100% en todos los casos. Intensidad de corriente entre 1 y 9 A.
- C-83 Con electrodos de aluminio, sin placas interpuestas, para la DQO, el grado de eliminación de la DQO estuvo por encima del 61% en todos los rangos de intensidades de corriente experimentados.
- C-84 Con electrodos de aluminio, sin placas interpuestas, en cuanto a los SST, La eliminación de los SST también fue buena, por encima del 50%.

- C-85 Con electrodos de aluminio, sin placas interpuestas, y según la normativa de reutilización de las aguas, dependiendo de sus usos, el agua obtenida, con intensidades de corriente a partir de 1 A, alcanzó una reducción de la turbidez superior al 80%, quedando en valores inferiores a 2 NTU, siendo apta para la reutilización del agua tratada para usos urbanos, calidad 1.1 Residencial: riego de jardines privados y descarga de aparatos sanitarios, cuyo límite es de 2 NTU. En cuanto a los SS se considera apta para todos los usos que menciona la norma, excepto para: Usos urbanos calidad 1.1 residencial, que fija un valor máximo de 10 mg/l en SS. Pero trabajando con 7 y 9 A, sí se ha alcanzado dicho criterio de calidad.
- C-86 Con electrodos de aluminio, sin placas interpuestas, en cuanto al nitrógeno total, la eliminación del nitrógeno fue moderada.

#### Experimentación con electrodos de hierro

En la tabla y gráfico siguientes se muestran los rendimientos promedios alcanzados trabajando con electrodos de hierro sin placa intermedia. El grado de eliminación de la DQO estuvo por encima del 51% en todos los rangos de intensidades de corriente experimentados.

El fósforo se eliminó casi totalmente.

La eliminación del nitrógeno y SST fue pobre.

La turbidez no se elimina al cabo de una hora de sedimentación que es el tiempo que se esperó para realizar los análisis, pero se observó que al día siguiente el agua mejoró sustantivamente.

Se observó que cuando se trabajó a 1 A, el agua que salía de la celda de electrocoagulación era de color amarillo naranja, bastante turbio no apreciándose flóculos. Al cabo de media hora hubo muy poco precipitado, lo cual incrementa la turbidez y los SS. Cuando se trabajó a 3 A, el agua era de color naranja oscuro con abundantes flóculos pequeños, que tardaron en sedimentar. En ambos casos el hierro presente en la solución estaba en estado férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ). Probablemente el mecanismo de eliminación de los contaminantes sea por arrastre o barrido de los flóculos que forman los coagulos que precipitan. A los 5 A, el agua que salía de la celda de electrocoagulación era de color amarillo verdoso con abundantes partículas que se iban agrupando, según pasaba el

tiempo, formándose los coágulos que precipitaban. En este caso, en la solución estaba presente el estado ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) que se va oxidando a férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ), y que al cabo de un tiempo el agua del decantador se tornaba de color naranja, es decir, que el Fe II pasaba a Fe III, por acción del oxígeno del aire, formándose los hidróxidos insolubles y quedando en el agua partículas muy pequeñas que no decantaban y siendo los responsables de la turbidez y el incremento de los SS en el clarificado. Cuando se trabajó a 7 y 9 A agua de salida era de color verde oscuro y se formaban muy rápidamente los coágulos, que precipitaban, dejando un clarificado ligeramente verdoso, que con el tiempo pasaba a color naranja.

En cuanto a los SST, se puede observar que en todos los casos experimentados la concentración estuvo por encima de 20 mg/l, siendo válida para distintos usos (cuando se requiere un máximo de 35 mg/l, según la normativa) como son usos agrícolas calidad 2.2, 2.3, usos industriales calidad 3.1, usos recreativos calidad 4.2, usos ambientales calidad 5.1 y 5.3.

En relación a la turbidez, se consideran los mismos usos, ya que no se fija límite en dichos criterios de calidad, aunque muchas veces fue mayor que el agua de entrada.

En cuanto al nitrógeno total, se alcanzó un rendimiento bajo, casi constante en todos los casos experimentados.

A (amperios)	DQO (%)	SST (%)	P-Total (%)	N-Total (%)	Turbidez (%)
1	51,1	45,7	61,3	22,2	0
3	57,8	0	70,4	20	0
5	60,3	20,3	96	16,1	0
7	82,4	59,9	94,8	25,6	7,7
9	69,5	45	96,2	22	0

Tabla 7.115. Rendimientos de eliminación obtenidos trabajando con electrodos de hierro sin placa intermedia.

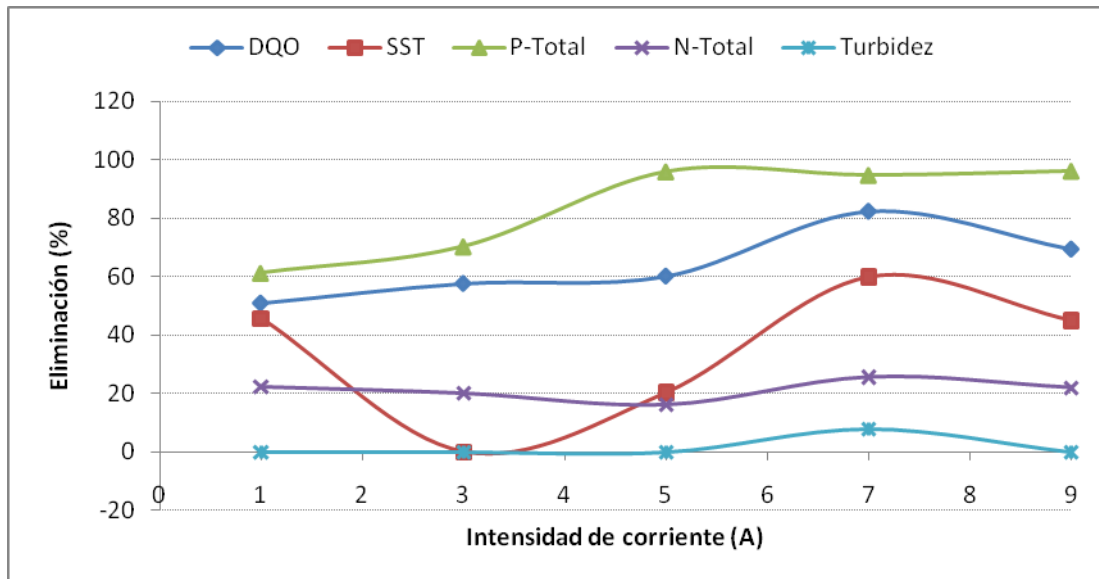


Figura 7.59. Eliminación de la DQO, P-total, N-total, SS, y Turbidez, con electrodos de hierro sin placa intermedia.

#### Conclusiones:

- C-87 Con electrodos de hierro, sin placas interpuestas, y en relación al fósforo total, puede decirse que el fósforo se eliminó casi totalmente. La eliminación ha sido prácticamente del 100% en todos los casos. Intensidad de corriente entre 1 y 9 A.
- C-88 Con electrodos de hierro, sin placas interpuestas, para la DQO, el grado de eliminación de la DQO estuvo por encima del 51% en todos los rangos de intensidades de corriente experimentados. Intensidad de corriente entre 1 y 9 A. Para 7 A, se alcanzó un rendimiento superior al 80%.
- C-89 Con electrodos de hierro, sin placas interpuestas, en cuanto a los SST, La eliminación de los SST fue buena, por encima del 50%, para intensidades de 7 a 9 A.
- C-90 Con electrodos de hierro, sin placas interpuestas, en cuanto al nitrógeno total, la eliminación del nitrógeno fue escasa.

#### Comparación de resultados con electrodos de aluminio o con electrodos de hierro sin placas interpuestas.

C-91 En la comparación de rendimientos entre placas de aluminio y hierro sin placas, pueden darse las siguientes conclusiones:



- 1) En relación con la DQO, a intensidades inferiores a 9 A, con electrodos de aluminio se obtienen mayores rendimientos.
- 2) En relación con los SST, a intensidades inferiores a 9 A, con electrodos de aluminio se obtienen mayores rendimientos.
- 3) En relación con la turbidez, siempre, con electrodos de aluminio se obtienen mayores rendimientos. Con electrodos de hierro los rendimientos son muy escasos.
- 4) En relación con el P, a intensidades superiores a 1 A, con electrodos de aluminio se obtienen rendimientos superiores a los obtenidos con electrodos de hierro.
- 5) En relación con el N, a intensidades entre 5 y 7 A, con electrodos de hierro se obtienen mayores rendimientos.

A continuación se muestran las gráficas comparativas de todos los parámetros entre electrodos de hierro y aluminio.

En el gráfico siguiente se puede observar la diferencia de eliminación de la DQO entre ambos electrodos:

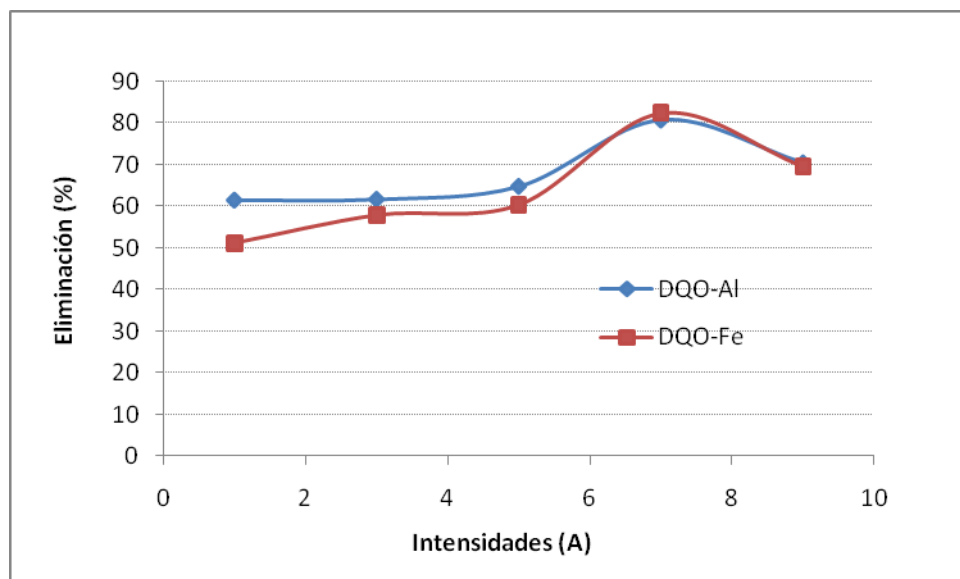


Figura 7.60. Comparación de eliminación de la DQO entre electrodos de Fe y Al.

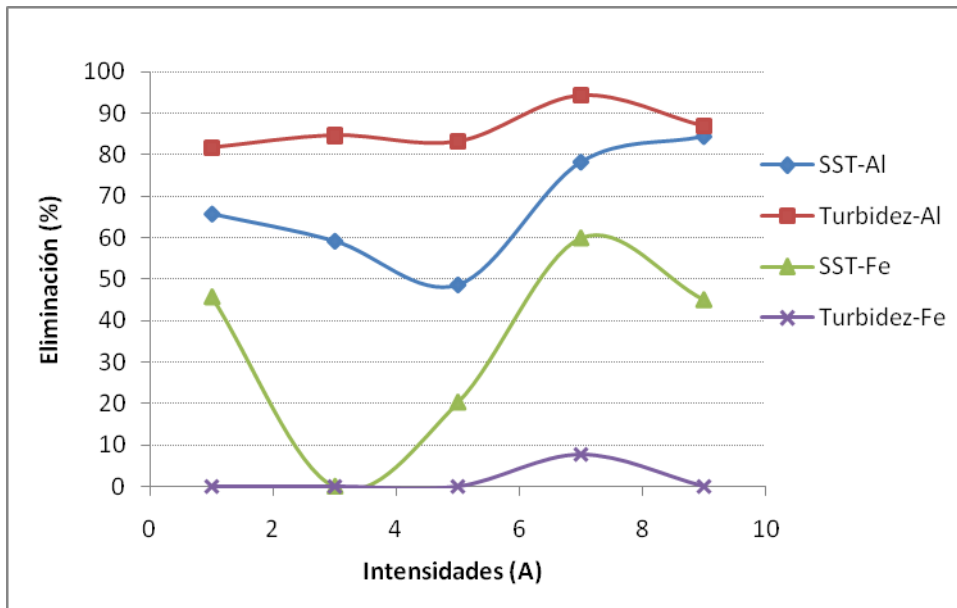


Figura 7.61. Comparación de eliminación de los SST y de la turbidez entre electrodos de Fe y Al.

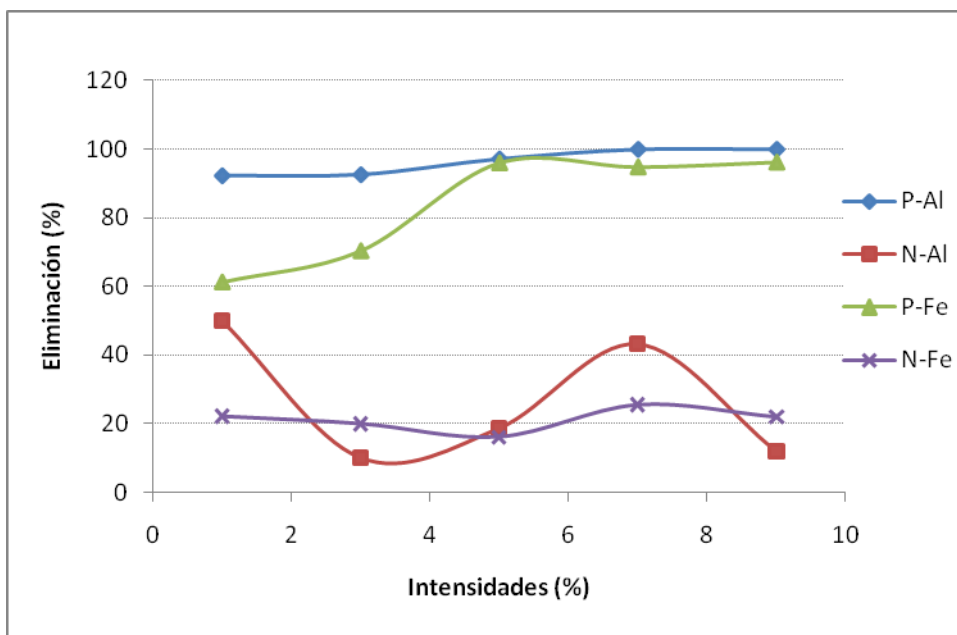


Figura 7.62. Comparación de eliminación del P-total y N-total entre electrodos de Fe y Al.

- Resultados de eliminación de microorganismos

Como se puede observar en la tabla y gráfico siguientes, se alcanzó una ligera reducción de 2 décadas logarítmicas de *coliformes totales* cuando se trabajó con electrodos de aluminio a partir de 3 A de intensidad de corriente. Para el caso de la celda conteniendo electrodos de hierro se

alcanzó una eliminación bastante pobre, tan solo a 9 A se reducen 3 décadas logarítmicas, lo que equivale a un 99,8%.

Amperios	Entrada (UFC/100 ml)	Salida Al (UFC/100 ml)	Salida Fe (UFC/100 ml)
1	1,38E+06	3,60E+05	1,16E+06
3	1,62E+06	7,80E+04	2,65E+05
5	2,56E+06	5,65E+04	4,13E+05
7	3,24E+06	2,01E+04	1,03E+04
9	2,41E+06	1,84E+04	3,72E+03

Tabla 7.116. Resultados promedios de Coliformes totales en el agua de entrada y a la salida de la celda de aluminio y la de hierro sin placa intermedia.

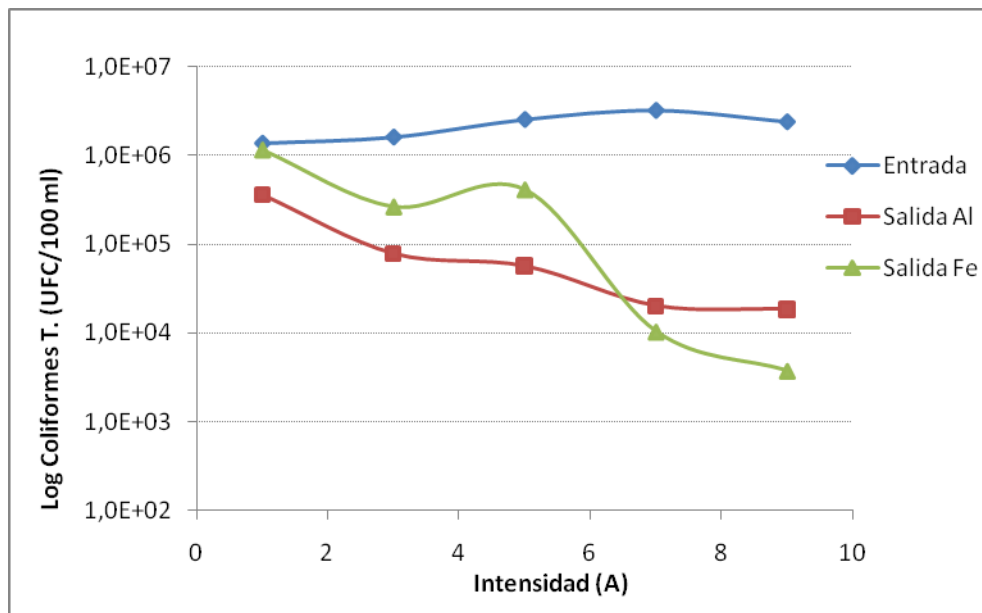


Figura 7.63. Eliminación de coliformes T., con electrodos de aluminio y hierro

La tabla y gráfico siguientes muestran los rendimientos obtenidos en la eliminación de E. Coli, en la presente investigación, utilizando electrodos de aluminio y hierro sin placa intermedia entre electrodos. Se puede observar que a partir de 5 A, se logra una reducción de 2 décadas logarítmicas, para el caso de electrodos de aluminio. En cambio para el hierro, a partir de 7 A, se alcanzan mejores reducciones de E. Coli.

Según la normativa de reutilización, exigida por el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (BOE nº 294, 08/12/2007), el agua obtenida mediante el proceso de electrocoagulación usando electrodos de

aluminio, a partir de 5 A, cumplen los requisitos exigidos por la norma para ciertos usos, como son para: Usos agrícolas, calidad 2.3. Usos industriales, calidad 3.1. Usos recreativos, calidad 4.2, que fijan un límite máximo de 10.000 UFC/100 ml. Cuando se trabajó con electrodos de hierro a 7 A, el efluente obtenido sería apto para los usos anteriormente mencionados, y a 9 A el efluente sería apto para otros usos más restrictivos excepto para los casos donde se requiera 0 UFC/100 ml, ya que la reducción a esas intensidades de corriente fue de 38 UFC/100 ml.

Amperios	Entrada (UFC/100 ml)	Salida Al (UFC/100 ml)	Salida Fe (UFC/100 ml)
1	1,40E+05	7,00E+04	1,10E+05
3	4,60E+05	2,00E+04	7,50E+04
5	5,45E+05	6,85E+03	5,00E+04
7	6,60E+05	9,78E+03	8,20E+03
9	6,45E+05	3,40E+03	3,80E+01

Tabla 7.117. Resultados promedios de *E. Coli* en el agua de entrada y a la salida de la celda de aluminio y la de hierro sin placa intermedia.

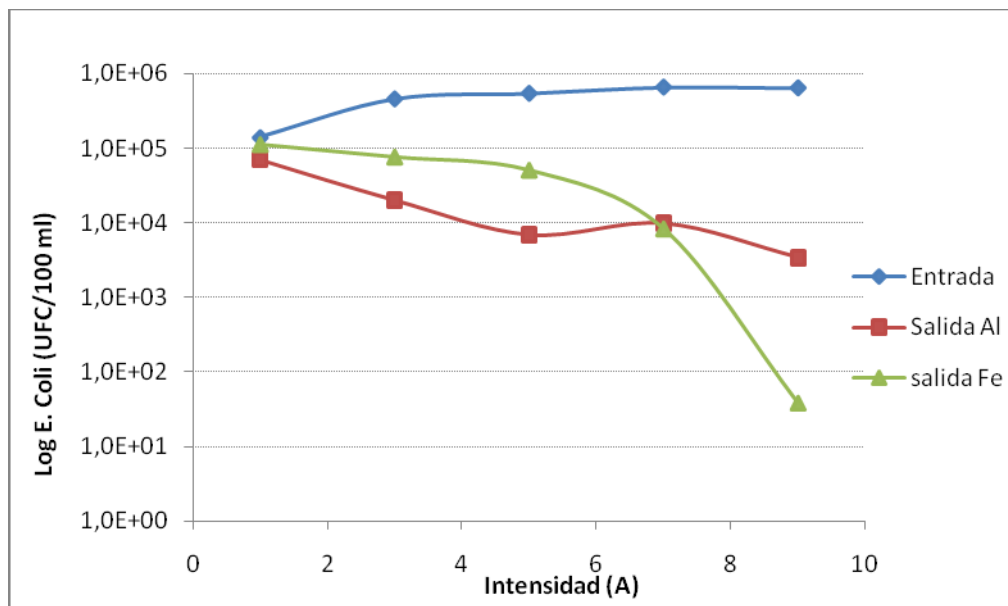


Figura 7.64. Eliminación de *E. Coli*, con electrodos de aluminio y hierro

En las siguientes tablas se pueden observar con mayor detalle la comparación de los resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio y hierro sin placa intermedia, a diferentes intensidades de corriente.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	26,1	7,12	6,02	788	7,6	20	1,3	36	69,5
Salida	29,5	7,98	3,85	823	1,77	19	0,0	1	24,5

Tabla 7.118. Resultados, trabajando con electrodos de aluminio sin placa intermedia a 9 A y 58 V.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	26,1	7,12	6,02	788	7,6	20	1,3	36	69,5
Salida	29,8	7,95	0,08	831	22,6	15	0,1	23	22,5

Tabla 7.119. Resultados, trabajando con electrodos de hierro sin placa intermedia a 9 A y 53 V.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	25,3	7,18	5,22	694	21,4	9	1,9	49	92,5
Salida	28,4	7,68	4,01	718	1,04	5	0,0	9	21

Tabla 7.120. Resultados, trabajando con electrodos de aluminio sin placa intermedia a 7 A y 53 V

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	25,3	7,18	5,22	694	21,4	9	1,9	49	92,5
Salida	28,4	7,63	0,12	711	25,4	7	0,1	23	7

Tabla 7.121. Resultados, trabajando con electrodos de hierro sin placa intermedia a 7 A y 46 V

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	26,0	7,26	4,45	843	12,4	20,5	1,0	37	69
Salida	27,7	7,54	4,18	853	1,39	17	0,1	17	22

Tabla 7.122. Resultados, trabajando con electrodos de aluminio sin placa intermedia a 5 A y 33 V

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	26,0	7,26	4,45	843	12,4	20,5	1,0	37	69
Salida	26,9	7,30	0,98	841	25,9	18,5	0,0	22	26,5

Tabla 7.123. Resultados, trabajando con electrodos de hierro sin placa intermedia a 5 A y 30 V

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	26,0	7,17	5,64	806	9	15,0	1,35	24	64
Salida	26,3	7,27	4,48	801	1,39	13,5	0,1	9	24,5

Tabla 7.124. Resultados, trabajando con electrodos de aluminio sin placa intermedia a 3 A y 21 V

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	26,0	7,17	5,64	806	9	15,0	1,35	24	64
Salida	26,4	7,28	3,39	800	41,5	12	0,4	22	27

Tabla 7.125. Resultados, trabajando con electrodos de hierro sin placa intermedia a 3 A y 19 V

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	26,9	7,20	4,95	785	13,1	9,0	1,3	35	67,5
Salida	26,9	7,24	5,10	760	2,41	4,5	0,1	12	26

Tabla 7.126. Resultados, trabajando con electrodos de aluminio sin placa intermedia a 1 A y 9 V

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	26,9	7,20	4,95	785	13,1	9,0	1,3	35	67,5
Salida	26,9	7,22	4,90	754	14,1	7,0	0,5	19	33

Tabla 7.127. Resultados, trabajando con electrodos de hierro sin placa intermedia a 1 A y 9 V

- C-92 Con electrodos de aluminio, sin placas interpuestas, se alcanzó una ligera reducción de 2 décadas logarítmicas de *coliformes totales* cuando se trabajó con electrodos de aluminio a partir de 3 A de intensidad de corriente. Para el caso de la celda conteniendo electrodos de hierro se alcanzó una eliminación bastante pobre, tan solo a 9 A se reducen 3 décadas logarítmicas, lo que equivale a un 99,8%.
- C-93 Con electrodos de aluminio, sin placas interpuestas, en cuanto a la reducción de *E. coli*, utilizando electrodos de aluminio y hierro sin placa intermedia entre electrodos. Se puede observar que a partir de 5 A, se logra una reducción de 2 décadas logarítmicas, para el caso de electrodos de aluminio. En cambio para el hierro, a partir de 7 A, se alcanzan mejores reducciones de *E. Coli*.
- C-94 Con electrodos de aluminio, sin placas interpuestas, según la normativa de reutilización, exigida por el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (BOE nº 294, 08/12/2007), el agua obtenida mediante el proceso de electrocoagulación usando electrodos de aluminio, a partir de 5 A, cumplen los requisitos exigidos por la norma para ciertos usos, como son para: Usos agrícolas, calidad 2.3. Usos industriales, calidad 3.1. Usos recreativos, calidad 4.2, que fijan un límite máximo de 10.000 UFC/100 ml. Cuando se trabajó con electrodos de hierro a 7 A, el efluente obtenido sería apto para los usos anteriormente mencionados, y a 9 A el efluente sería apto para otros usos más

restrictivos excepto para los casos donde se requiera 0 UFC/100 ml, ya que la reducción a esas intensidades de corriente fue de 38 UFC/100 ml.

**C) Resultados, utilizando electrodos de aluminio y hierro en combinación con cátodo de grafito, sin placa conductora intermedia. Referentes a los parámetros fisicoquímicos como son: SS, turbidez, nitrógeno y fósforo**

Resultados obtenidos trabajando con electrodos de Aluminio-grafito

Las características eléctricas de los ensayos se definen en el siguiente cuadro.

Al	9 A, 58 V	7 A, 53 V	5 A, 38 V	3 A, 20 V	1 A, 10 V
Fe	9 A, 58 V	7 A, 46 V	5 A, 38 V	3 A, 20 V	1 A, 10 V

*Tabla 7.128. Características de los ensayos*

Como se puede observar en la tabla y gráfico siguientes, el grado de eliminación de la DQO estuvo entre 42,5 y 66% en los rangos de voltajes experimentados. Siendo la eliminación del fósforo total, excepto a 10 V con 1,3 A. Para el caso de P-total la norma fija un máximo de 2 mg/l, mientras que en el agua obtenida en la presente investigación solo trabajando a 10 V fue de 0,1 mg/l.

La eliminación del nitrógeno fue bastante mejor llegando a eliminarse el 71 % a los 38 V con 5,8 A, y los 58 V con 9,5 A fue bastante pobre. La eliminación de los SST fue regular, entre el 25 y el 59%. También el agua del secundario que alimentaba a la planta tenía pocos SS en comparación con las fechas anteriores de los experimentos ya mencionados. En relación a la turbidez el rendimiento alcanzado fue muy bueno estando por encima del 80%.

Según la normativa de reutilización de las aguas según sus usos, en el agua obtenida en esta experimentación, se alcanzó una reducción de la turbidez a valores inferiores a 1,5 NTU, que se considera apta para la reutilización del agua tratada para todos los usos, pero por los SS no sería apta para los usos que menciona, con un valor máximo de 10 mg/l en SS, porque los SS obtenidos han sido de 12 mg/l.

V/amperios (voltios)	A (amperios)	DQO (%)	SST (%)	P-Total (%)	N-Total (%)	Turbidez (%)
10V	1,3	42,9	44,4	80	42,1	80,9
20 V	2,8	42,5	59,1	100	50	87,3
38 V	5,8	60,2	25	100	71,4	92,2
58 V	9,5	66,3	33,3	100	16,7	90,3

Tabla 7.129. Rendimientos de eliminación obtenidos trabajando con electrodos de aluminio-grafito

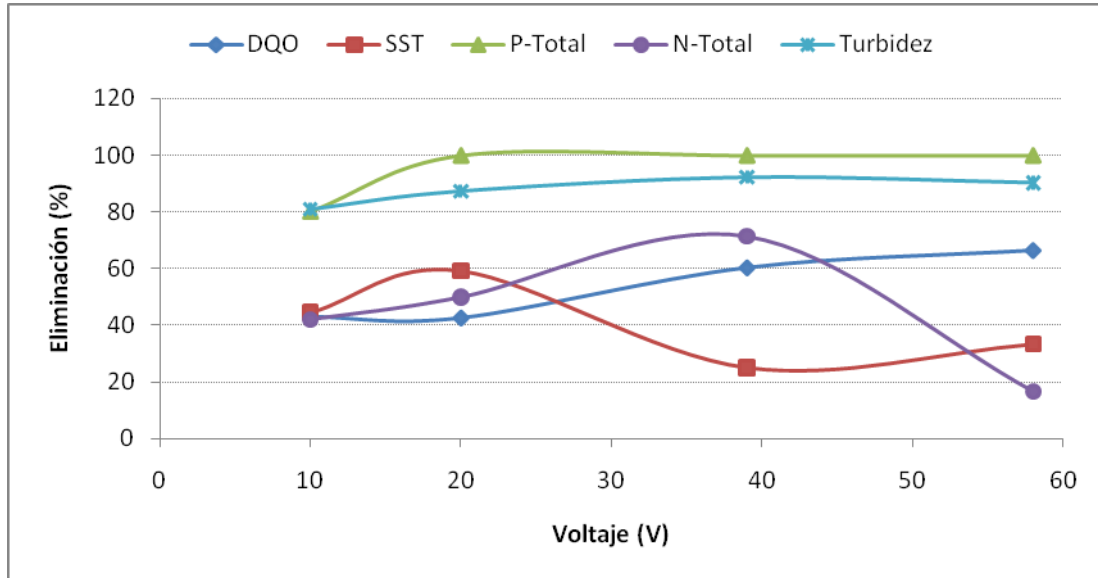


Figura 7.65. Eliminación de la DQO, P-total, N-total, SS, y Turbidez, con electrodos de aluminio-grafito.

#### Conclusiones:

- C-95 Con electrodos de aluminio y grafito, sin placas interpuestas, y en relación al fósforo total, se puede decir que la eliminación ha sido prácticamente del 100% en todos los casos, excepto a 10 V con 1,3 A. Para el caso de P-total la norma fija un máximo de 2 mg/l, mientras que en el agua obtenida en la presente investigación. Solo trabajando a 10 V y 1 A, el rendimiento fue del 80%, saliendo el agua con una turbidez inferior a 0,1 mg/l.
- C-96 Con electrodos de aluminio y cátodo de grafito, sin placas interpuestas, para la DQO, el grado de eliminación de la DQO estuvo entre 42,5 y 66% en los rangos de voltajes experimentados.
- C-97 Con electrodos de aluminio con cátodo de grafito, sin placas interpuestas, la eliminación de los SST fue media, entre el 25 y el 59%, con los mejores resultados entre 10 y 30 V.



- C-98 Con electrodos de aluminio y cátodo de grafito, sin placas interpuestas, y según la normativa de reutilización de las aguas según sus usos, en el agua obtenida en esta experimentación, se alcanzó una reducción de la turbidez a valores inferiores a 1,5 NTU, que se considera apta para la reutilización del agua tratada para todos los usos, pero por los SS no sería apta para los usos que menciona, con un valor máximo de 10 mg/l en SS, porque los SS obtenidos han sido de 12 mg/l.
- C-99 Con electrodos de aluminio y cátodo de grafito, sin placas interpuestas, en cuanto al nitrógeno total, la eliminación del nitrógeno fue moderada, valores de reducción superiores al 40% para diferencia de potencial entre 10 y 50 V.

#### Resultados obtenidos trabajando con electrodos de hierro-grafito

En la tabla y gráfico siguientes, se muestran los rendimientos promedios alcanzados trabajando con electrodos de hierro como ánodo y grafito como cátodo. El grado de eliminación de la DQO ha variado desde el 33 a 60% con los voltajes experimentados. Mientras que el fósforo se elimina totalmente, excepto a 10 V con 1,3 A, que se redujo en un 60%. La eliminación del nitrógeno fue regular entre 25 y 57%. La turbidez se ha incrementado, debido al color amarillo naranja y pequeñas partículas que siempre quedan en el clarificado por mucho tiempo, siendo debido a la presencia de compuesto de Fe III, que es insoluble y se adhiere a las paredes del decantador coloreándolo. Esta coloración y las pequeñas partículas que quedan son las responsables del aumento de los SS y la turbidez. Solo a los 58 voltios con 9,1 A el agua que salía del electrocoagulador era de color verde oscuro, los flóculos que se formaban agrupándose y precipitando rápidamente, quedando siempre pequeñas partículas que se volvían de color naranja y no precipitaban.

Se observó que cuando se trabajó a 10 V con 1,3 A el agua que salía de la celda de electrocoagulación era de color amarillo naranja bastante turbia, no apreciándose flóculos; al cabo de media hora no había ningún precipitado; se dejó decantar otra media hora obteniéndose muy poco precipitado, lo cual incrementa la turbidez y los SS. Cuando se trabajó a 20 V con 3 A y 38 V con 6 A, el agua que salía de la celda de electrocoagulación era de color amarillo verdoso con abundantes partículas que se iban agrupando según pasaba el tiempo formándose los coágulos que precipitaban. En este caso, en la solución estaba presente el estado ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) que se va oxidando a férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ). Al cabo de un tiempo el agua del decantador se tornaba de color

naranja, es decir que el Fe II pasaba a Fe III por acción del oxígeno del aire, formándose los hidróxidos insolubles y quedando en el agua partículas muy pequeñas que no decantaban y siendo los responsables de la turbidez y el incremento de los SS en el clarificado.

En cuanto a los SST, se puede observar que en todos los casos experimentados la concentración estuvo por encima de 20 mg/l, que sería válida para distintos usos (cuando por la normativa se requiere un máximo de 35 mg/l) como son para usos agrícolas calidad 2.2, 2.3, usos industriales calidad 3.1c, usos recreativos calidad 4.2, usos ambientales calidad 5.1 y 5.3. Y los mismos usos se consideran en relación a la turbidez, ya que en la normativa no se fijan límites, ya que muchas veces fue mayor que el agua de entrada.

V (voltios)	A (amperios)	DQO (%)	SST (%)	P-Total (%)	N-Total (%)	Turbidez (%)
10	1,3	33,3	0	60	36,8	0
20	3	46	9,1	100	33,3	0
38	6	60,2	23,5	100	57,1	0
58	9,1	50	50	100	25	48,2

Tabla 7.130. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de hierro-grafito

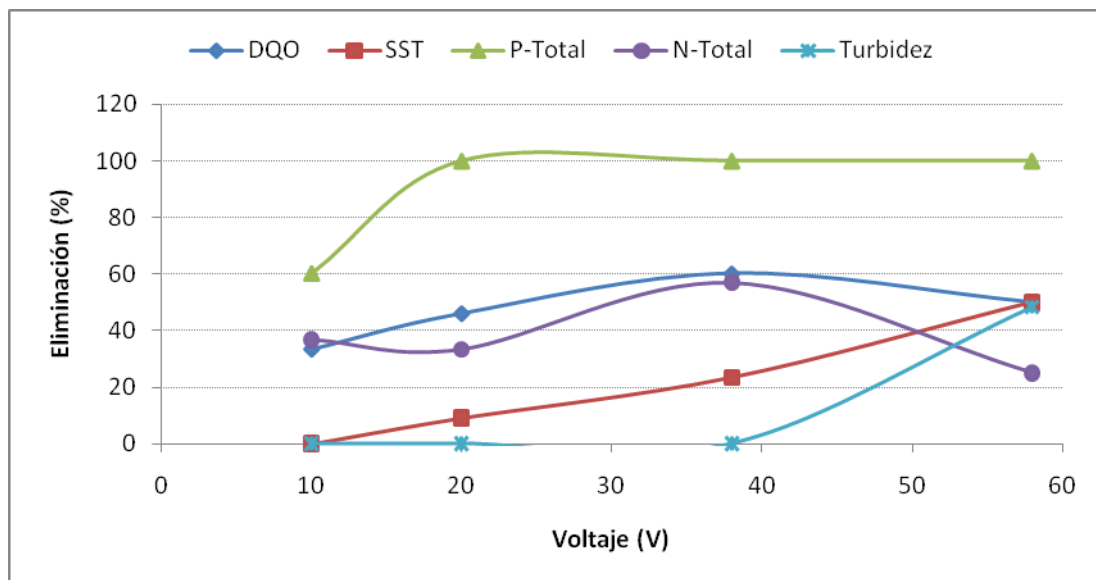


Figura 7.66. Eliminación de la DQO, P-total, N-total, SS, y Turbidez, con electrodos de hierro-grafito.

En los siguientes gráficos se realiza una comparación de la eliminación de los parámetros fisicoquímicos entre electrodos de aluminio y hierro.

En el gráfico siguiente, se muestra una comparación en la eliminación de la DQO entre electrodos de aluminio y hierro.

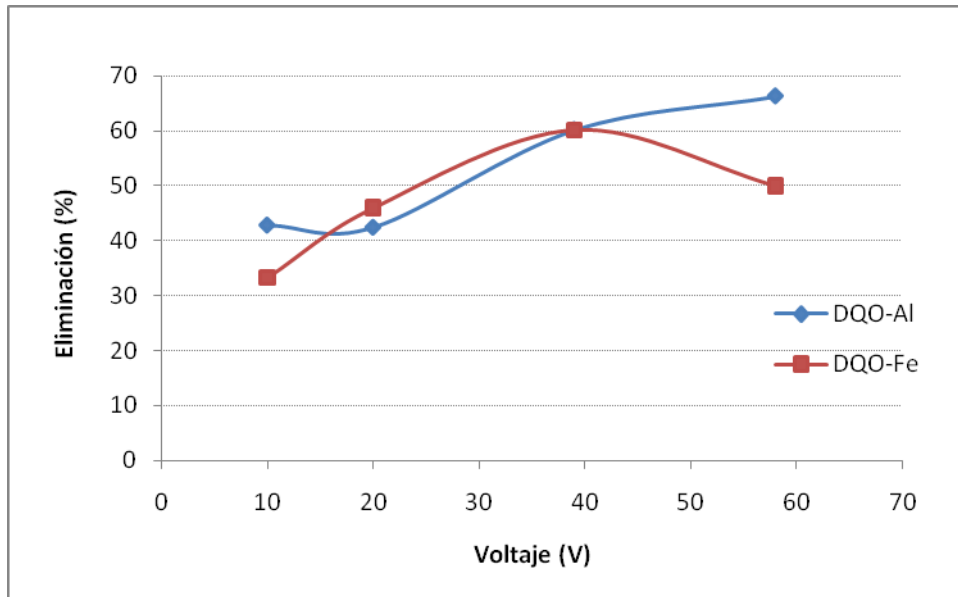


Figura 7.67. Comparación de eliminación de la DQO entre electrodos de hierro-grafito y aluminio-grafito.

En el gráfico siguiente, se muestra una comparación en la eliminación de los SST y la turbidez entre electrodos de aluminio y hierro.

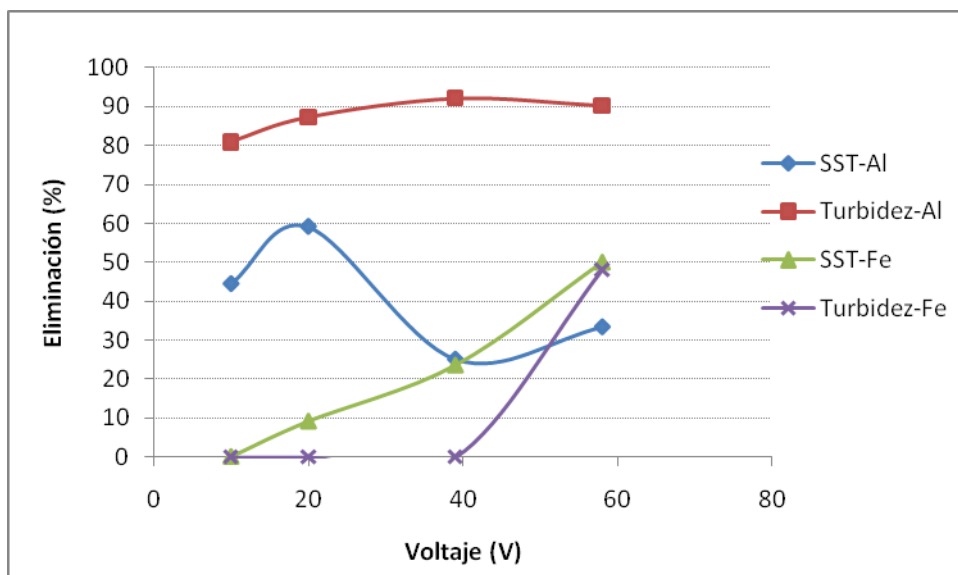


Figura 7.68. Comparación de eliminación de la DQO entre electrodos de hierro-grafito y aluminio-grafito.

**Conclusiones:**

- C-100 Con electrodos de hierro y cátodo de grafito, sin placas interpuestas, y en relación al fósforo total, puede decirse que el fósforo se elimina totalmente, excepto a 10 V con 1,3 A, que se redujo en un 60%.
- C-101 Con electrodos de hierro y cátodo de grafito, sin placas interpuestas, el grado de eliminación de la DQO ha variado desde el 33 a 60% con los voltajes experimentados. Valor óptimo a 40 V.
- C-102 Con electrodos de hierro y cátodo de grafito, sin placas interpuestas, en cuanto a los SST, La eliminación de los SST fue del 20% al 40%, con voltajes entre 40 y 60 V.
- C-103 Con electrodos de hierro, sin placas interpuestas, la eliminación del nitrógeno fue regular entre 25 y 57%. Valor óptimo a 40 V.
- C-104 En la comparación de rendimientos entre placas de aluminio y hierro sin placas, pueden darse las siguientes conclusiones:
  1. En relación con la DQO, a voltajes de 10 a 60 V, con electrodos de aluminio se obtienen ligeramente mayores rendimientos.
  2. En relación con los SST, a voltajes inferiores a 40 V, con electrodos de aluminio se obtienen mayores rendimientos.
  3. En relación con la turbidez, siempre, con electrodos de aluminio se obtienen mayores rendimientos. Con electrodos de hierro los rendimientos son muy escasos.
  
- Resultados microbiológicos

Como se puede observar en la tabla y gráfico siguientes, se alcanza una ligera reducción de entre 1 y 2 décadas logarítmicas de *coliformes totales* cuando se trabajó con electrodos de aluminio-grafito. Para el caso de la celda conteniendo electrodos de hierro-grafito, se alcanzan mejores rendimientos de eliminación de entre 2 y 3 décadas logarítmicas, lo que este último equivale a de un 98,7%.

Amperios	Entrada (UFC/100 ml)	Salida Al-C (UFC/100 ml)	Salida Fe-C (UFC/100 ml)
10	6,00E+06	1,44E+05	5,25E+05
38	9,40E+05	1,15E+04	4,90E+03
58	2,54E+06	1,04E+04	1,50E+03

Tabla 7.131. Resultados promedios de Coliformes totales en el agua de entrada y a la salida de la celda de aluminio-grafito y la de hierro-grafito.

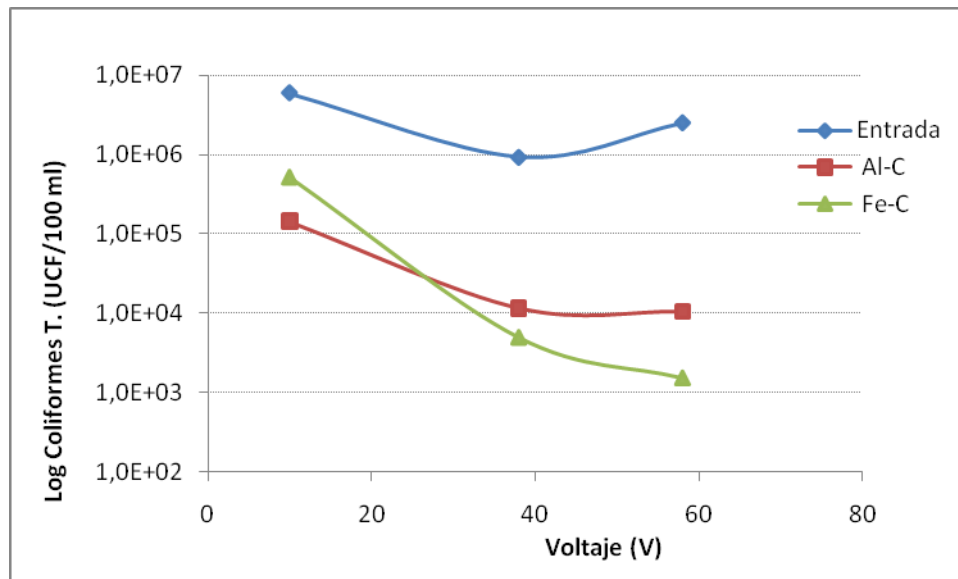


Figura 7.69. Eliminación de Coliformes totales, con electrodos de Al-grafito y Fe-grafito

La tabla y gráfico siguientes muestran los rendimientos obtenidos en la eliminación de E. Coli, en la presente investigación, utilizando electrodos de aluminio-grafito y hierro-grafito. Se puede observar que a 38 V con 5,8 A, se alcanza una reducción de 2 décadas logarítmicas, y a 58 V con 9 A se logra 3 décadas logarítmicas para el caso de electrodos de aluminio. En cambio para el hierro a partir de 38 V con 5,8 A se alcanzan reducciones de 3 décadas logarítmicas de E. Coli.

Según la normativa de reutilización, anteriormente mencionada. El agua obtenida mediante el proceso de electrocoagulación usando electrodos de aluminio-grafito a 38 V con 5,8 A cumplen los requisitos exigidos por la norma para ciertos usos, como para: Usos agrícolas, calidad 2.3. Usos industriales, calidad 3.1. Usos recreativos, calidad 4.2, que fijan un límite máximo de 10.000 UFC/100 ml, y a 58 V con 9 A el agua sería apta para los usos mencionados anteriormente además para Usos agrícolas: calidad 2.2, Usos industriales calidad 3.1c, y usos ambientales calidad 5.1, en los cuales la norma fija unos de límites de 1000 UFC/100 ml. Cuando se trabajó con electrodos de

hierro-grafito a 38 V con 5,8 A y 58 V con 9 A, el efluente obtenido sería apto para los usos anteriormente mencionados, ya que la cantidad de E. Coli fue de 700 y 300 UFC/100 ml respectivamente.

Amperios	Entrada (UFC/100 ml)	Salida Al-C (UFC/100 ml)	Salida Fe-C (UFC/100 ml)
10	2,40E+05	7,70E+03	3,00E+04
38	1,20E+05	1,20E+03	7,00E+02
58	2,00E+05	3,22E+02	3,00E+02

Tabla 7.132. Resultados promedios de E. Coli en el agua de entrada y a la salida de la celda de aluminio-grafito y la de hierro-grafito.

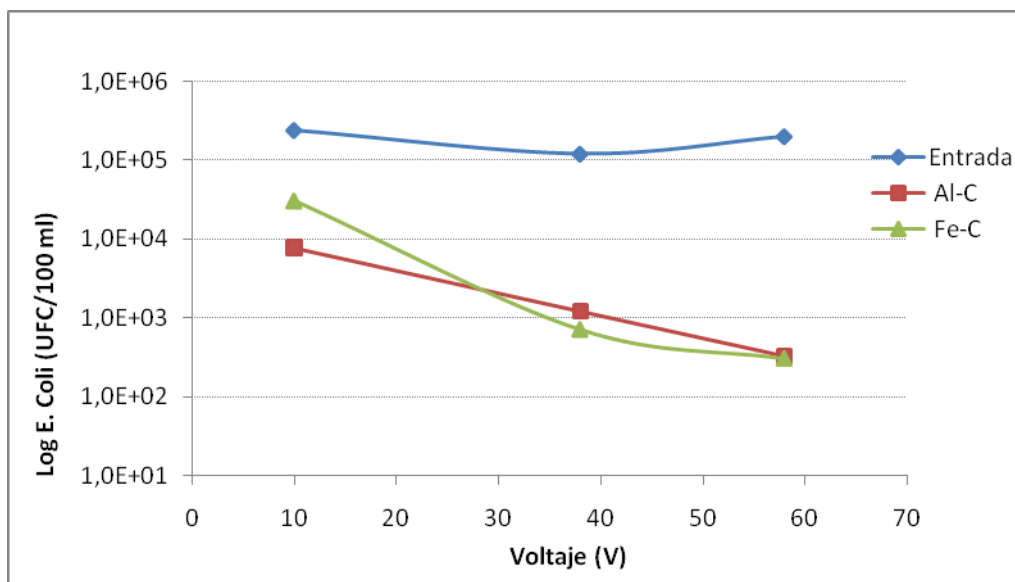


Figura 7.70. Eliminación de E. Coli, con electrodos de Al-grafito y Fe-grafito

En las siguientes tablas se pueden observar con mayor detalle la comparación de los resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio-grafito y hierro-grafito a diferentes voltajes.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. $\mu$ S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	25,6	6,80	5,15	760	6,20	3,0	0,6	18	43
Salida	30,2	7,37	4,26	811	0,59	2,0	0	12	14,5

Tabla 7.133. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio-grafito 58 V

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	25,6	6,80	5,15	760	6,20	3,0	0,6	18	43
Salida	29,8	7,51	0,09	809	12,35	1,0	0	23	14,5

Tabla 7.134. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de hierro-grafito 58 V

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	25,2	6,79	5,17	753	6,70	3,5	0,8	17	46,5
Salida	27,3	7,33	4,75	754	0,52	1,0	0	12	18,5

Tabla 7.135. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio-grafito 38 V

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	25,2	6,79	5,17	753	6,70	3,5	0,8	17	46,5
Salida	26,3	7,03	1,17	746	28,5	1,5	0	13	18,5

Tabla 7.136. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de hierro-grafito 38 V

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	25,3	6,80	5,74	742	5,5	3,5	0,8	22	43,5
Salida	25,3	7,01	5,4	720	0,7	1,5	0	9	25,0

Tabla 7.137. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio-grafito 20 V

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	25,3	6,80	5,74	742	5,5	3,5	0,8	22	43,5
Salida	25,5	7,13	2,79	732	15,1	2,0	0	20	23,5

Tabla 7.138. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de hierro-grafito 20 V

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	25,9	7,02	5,64	749	7,50	9,5	0,5	18	42,0
Salida	26,0	6,99	5,84	735	1,43	5,5	0,1	10	24,0

Tabla 7.139. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio-grafito 10 V

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. μS/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	25,9	7,02	5,64	749	7,50	9,5	0,5	18	42,0
Salida	25,9	7,08	4,87	717	25,0	6,0	0,2	26	28,0

Tabla 7.140. Resultados obtenidos trabajando con electrodos de hierro-grafito 10 V

- C-105 Con electrodos de aluminio y cátodo de grafito, sin placas interpuestas, se alcanza una ligera reducción de entre 1 y 2 décadas logarítmicas de *coliformes totales* cuando se trabajó con electrodos de aluminio-grafito. Para el caso de la celda conteniendo electrodos de hierro-grafito, se alcanzan mejores rendimientos de eliminación de entre 2 y 3 décadas logarítmicas, lo que este último equivale a de un 98,7%.
- C-106 Con electrodos de aluminio y cátodo de grafito, sin placas interpuestas, los rendimientos obtenidos en la eliminación de E. Coli, en la presente investigación, utilizando electrodos de aluminio-grafito y hierro-grafito. Se puede observar que a 38 V con 5,8 A, se alcanza una reducción de 2 décadas logarítmicas, y a 58 V con 9 A se logra 3 décadas logarítmicas para el caso de electrodos de aluminio. En cambio para el hierro a partir de 38 V con 5,8 A se alcanzan reducciones de 3 décadas logarítmicas de E. Coli.
- C-107 Con electrodos de aluminio y cátodo de grafito, sin placas interpuestas, según la normativa de reutilización, exigida por el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (BOE nº 294, 08/12/2007), El agua obtenida mediante el proceso de electrocoagulación usando electrodos de aluminio-grafito a 38 V con 5,8 A cumplen los requisitos exigidos por la norma para ciertos usos, como para: Usos agrícolas, calidad 2.3. Usos industriales, calidad 3.1. Usos recreativos, calidad 4.2, que fijan un límite máximo de 10.000 UFC/100 ml, y a 58 V con 9 A el agua sería apta para los usos mencionados anteriormente además para Usos agrícolas: calidad 2.2, Usos industriales calidad 3.1c, y usos ambientales calidad 5.1, en los cuales la norma fija unos de límites de 1000 UFC/100 ml. Cuando se trabajó con electrodos de hierro-grafito a 38 V con 5,8 A y 58 V con 9 A, el efluente obtenido sería apto para los usos anteriormente mencionados, ya que la cantidad de E. Coli fue de 700 y 300 UFC/100 ml respectivamente.
- **Rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación en relación con la modificación de la dureza del agua. (Objetivo 3.1.3)**

En la primera Fase del presente proyecto se hizo un estudio, a nivel laboratorio, experimentando con agua del Río Tajo (que tiene alta dureza), y se alcanzaron buenas reducciones de la dureza total y cálcica. Los ensayos fueron hechos en batch.

En la segunda Fase se ha analizado el agua depurada procedente del decantador secundario, variando la dureza total durante la experimentación desde 111 hasta 120 mg/l CaCO<sub>3</sub> y la dureza



cálcica desde 35,8 a 38 mg/l  $\text{Ca}^{2+}$ . Los experimentos se han llevado a cabo sin modificar el pH ni la conductividad. Siempre se trabajó a caudal constante en todos los experimentos realizados.

Los resultados obtenidos en la 3ª Fase aparecen en la tabla y gráfico siguientes, en los que se muestran los rendimientos alcanzados en la experimentación con placas de electrodo de aluminio y hierro, con placa intermedia entre electrodos. Con electrodos de aluminio a 7 y 9 A se alcanza un ligero rendimiento, por encima del 30 %. Mientras que con electrodos de hierro los rendimientos alcanzados fueron pobres.

Amperios	Electrodos de aluminio con placa intermedia		Electrodos de hierro con placa intermedia	
	Dureza T. (%)	D. Cálcica (%)	Dureza T. (%)	D. Cálcica (%)
1	5	18,5	3,7	6,5
3	13,2	22	4	14
5	17,5	29,5	16	13
7	33,6	36,3	17	21
9	32,6	36,9	19	18

Tabla 7.141. Resultados obtenidos en la reducción de la dureza, trabajando con electrodos aluminio y hierro con placa intermedia entre electrodos.

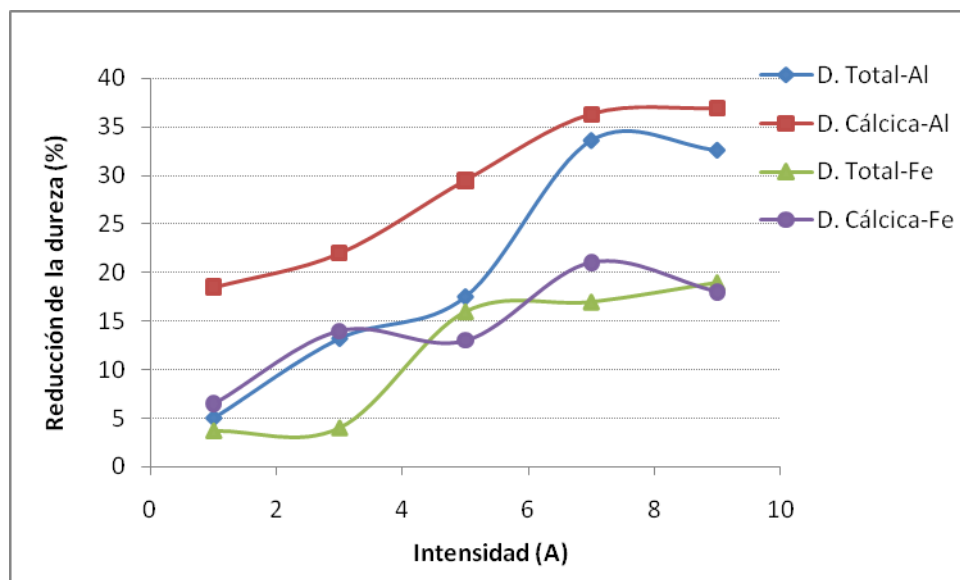


Figura 7.71. Comparación de la variación de la dureza total y cálcica con electrodos de aluminio y hierro con placa intermedia entre electrodos

A continuación se muestran los resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio y hierro, sin placa intermedia. En estas experiencias se produjo una disminución baja de la dureza total, y de la dureza cálcica, como pueden observarse en la tabla y gráfico siguiente, tanto, trabajando con electrodos de aluminio como con electrodos de hierro.

Amperios	Electrodos de aluminio sin placa intermedia		Electrodos de hierro sin placa intermedia	
	Dureza T. (%)	D. Cálcica (%)	Dureza T. (%)	D. Cálcica (%)
1	0	0	0	0
3	9	11	5,7	3,2
5	12	21,0	9	4,4
7	17	21,8	12	20
9	24,2	21	18,9	15,3

Tabla 7.142. Resultados obtenidos en la reducción de la dureza, trabajando con electrodos aluminio y hierro sin placa intermedia entre electrodos.

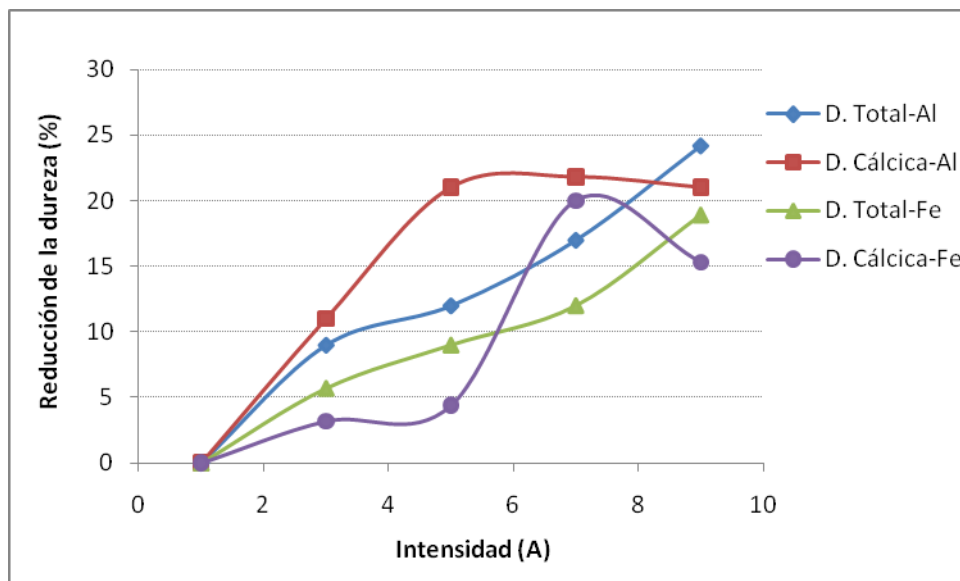


Figura 7.72. Comparación de la variación de las durezas total y cálcica con electrodos de aluminio y hierro

A continuación se muestran los resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio-grafito y hierro-grafito. El rendimiento alcanzado es muy bajo tanto en la dureza total como en la dureza cálcica, como pueden observarse en la tabla y gráfico siguiente, en ambos casos.

Voltios	Electrodos de Al-grafito		Electrodos de Fe-grafito	
	Dureza T. (%)	D. Cálcica (%)	Dureza T. (%)	D. Cálcica (%)
58	7,4	8,5	9,9	5,8
38	7,7	8,4	6	7,4
20	5,8	9,3	4,2	6,2
10	1,7	6,3	1,7	3,2

Tabla 7.143. Resultados obtenidos en la reducción de la dureza, trabajando con electrodos aluminio-grafito y hierro-grafito.

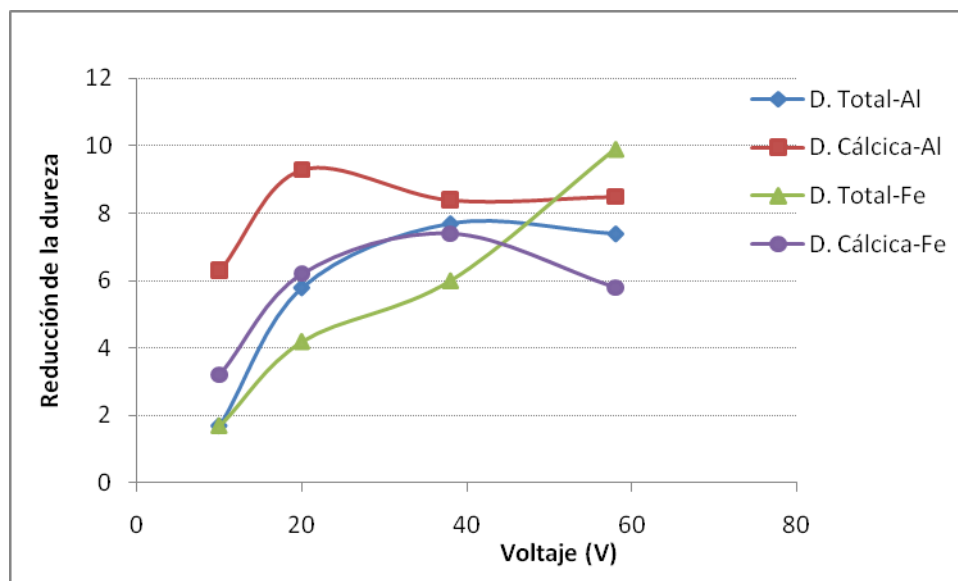


Figura 7.73. Comparación de la variación de las durezas total y cálcica con electrodos de aluminio-grafito y hierro-grafito.

A continuación se muestran los resultados obtenidos trabajando con electrodos de aluminio y hierro, modificando la conductividad del agua que alimentaba a las celdas electrolíticas. El rendimiento alcanzado es muy bajo tanto en la dureza total como en la dureza cálcica, como pueden observarse en la tabla y gráfico siguientes, en ambos casos, trabajando a una intensidad de corriente de 9 A.

NaCl (mg/l)	Electrodos de Al		Electrodos de Fe	
	Dureza T. (%)	D. Cálctica (%)	Dureza T. (%)	D. Cálctica (%)
75,47	11	12	9,3	0
188,68	11	8,9	7,7	4,3
301,89	9,9	11,7	9,9	9,6
415,09	8,4	11,6	7,6	4,2

Tabla 7.144. Resultados obtenidos en la reducción de la dureza, trabajando con electrodos aluminio y hierro, modificando la conductividad del agua de entrada a las celdas.

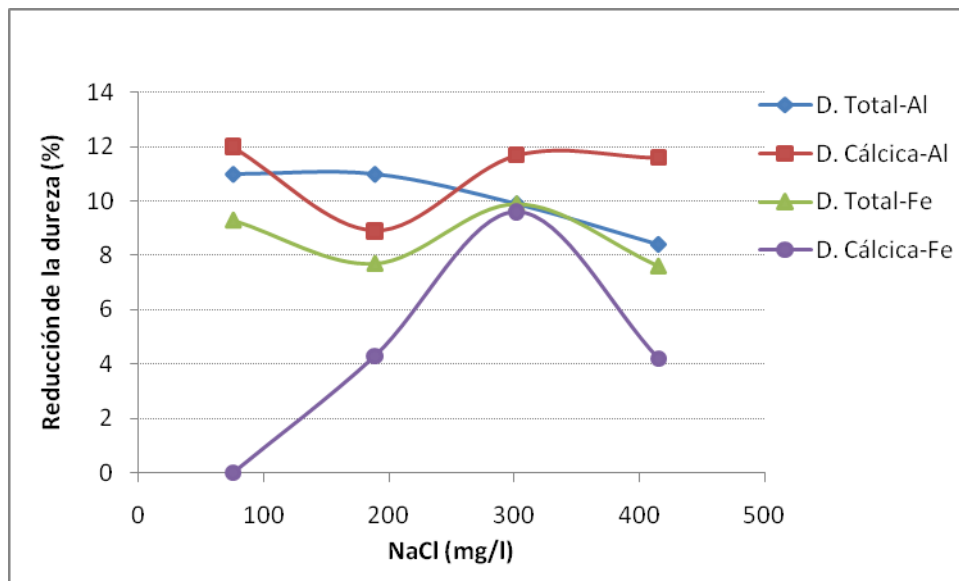


Figura 7.74. Comparación de la variación de las durezas total y cálcica con electrodos de aluminio y hierro, modificando la conductividad del agua de entrada a las celdas.

## Conclusiones

- C-108 Con electrodos de aluminio y hierro, con placas interpuestas, con electrodos de aluminio a 7 y 9 A se alcanza un ligero rendimiento, por encima del 30 %. Mientras que con electrodos de hierro los rendimientos alcanzados fueron pobres.
- C-109 Con electrodos de aluminio y hierro, con placas interpuestas, sin placa intermedia. En estas experiencias se produjo una disminución baja de la dureza total, y de la dureza cálcica, tanto, trabajando con electrodos de aluminio como con electrodos de hierro.
- C-110 Con electrodos de aluminio-grafito y hierro-grafito. El rendimiento alcanzado es muy bajo tanto en la dureza total como en la dureza cálcica.

- C-111 Con electrodos de aluminio y hierro, modificando la conductividad del agua que alimentaba las celdas electrolíticas. El rendimiento alcanzado es muy bajo tanto en la dureza total como en la dureza cálcica, trabajando a una intensidad de corriente de 9 A.
- **Rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación con la modificación de la conductividad de las aguas efluentes del secundario.**

Se prepararon soluciones de NaCl a las concentraciones que se muestran en la tabla siguiente. Los resultados que se muestran corresponden a los obtenidos trabajando con electrodos de aluminio. La intensidad de corriente ha variado de 9 a 9,8 A durante la experimentación con los voltajes que se muestran en la tabla siguiente, que fue el que daba según se incrementaba la conductividad.

Como puede observarse en la siguiente tabla y gráfico, el porcentaje de eliminación de la DQO ha variado desde 58 % hasta un 78%. Mientras que sin modificar la conductividad a esta misma intensidad de corriente la eliminación de la DQO fue del 70%, y la eliminación del nitrógeno y la turbidez fue ligeramente menor en comparación cuando se modificó la conductividad.

La concentración efectiva de NaCl en el agua que entraba a la celda de electrocoagulación estaba entre 180 -300 mg/l. Con dichas concentraciones se han logrado altos rendimientos en DQO, SS, fósforo, nitrógeno y turbidez. Además con reducción del voltaje, y por tanto en el consumo de energía eléctrica.

Para el caso de P-total la norma fija un máximo de 2 mg/l, mientras que el agua obtenida en la presente investigación fue de 0,1 mg/l, trabajando a 34 V.

NaCl ( mg/l)	DQO (%)	SST (%)	P-total (%)	N-Total (%)	Turbidez (%)
75,47	58,3	0	75	0	87,8
188,68	77,4	80	100	35,7	95,6
301,89	78,2	74,5	100	54,5	90,6
415,09	68	63	100	16,7	84,7

*Tabla 7.145. Resultados obtenidos en la reducción de la DQO, SS, P-total, N-total, y turbidez, trabajando con electrodos de aluminio, modificando la conductividad del agua de entrada a las celdas.*

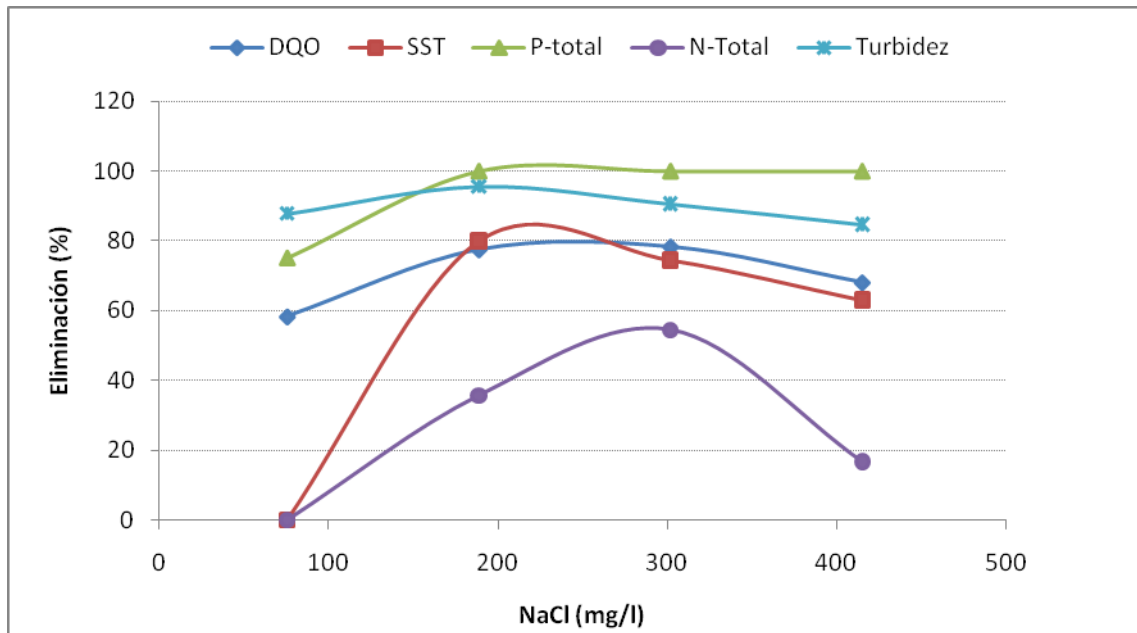


Figura 7.75. Rendimiento en la eliminación de la DQO, SS, P-total, N-total, y turbidez en función de la concentración de NaCl, con electrodos de aluminio.

En la tabla y gráfico siguientes se muestran el incremento de la conductividad del agua procedente del decantador secundario, que sirve de alimento a la planta piloto, al adicionar cloruro de sodio como electrolito. Se observa además que el voltaje disminuyó de 34 a 21 voltios. Y el consumo de energía eléctrica ha bajado desde 1,54 kWh/m<sup>3</sup> con 34 voltios hasta 1,045 kWh/m<sup>3</sup> con 21 voltios.

NaCl (mg/l)	Voltios	Entrada (mS/cm)	Salida (mS/cm)
0,0	58	0,774	0,816
75,47	34	0,903	0,91
188,68	30	1,135	1,16
301,89	24	1,404	1,443
415,09	21	1,638	1,682

Tabla 7.146. Modificación de la conductividad y el voltaje en la celda con electrodos de aluminio.

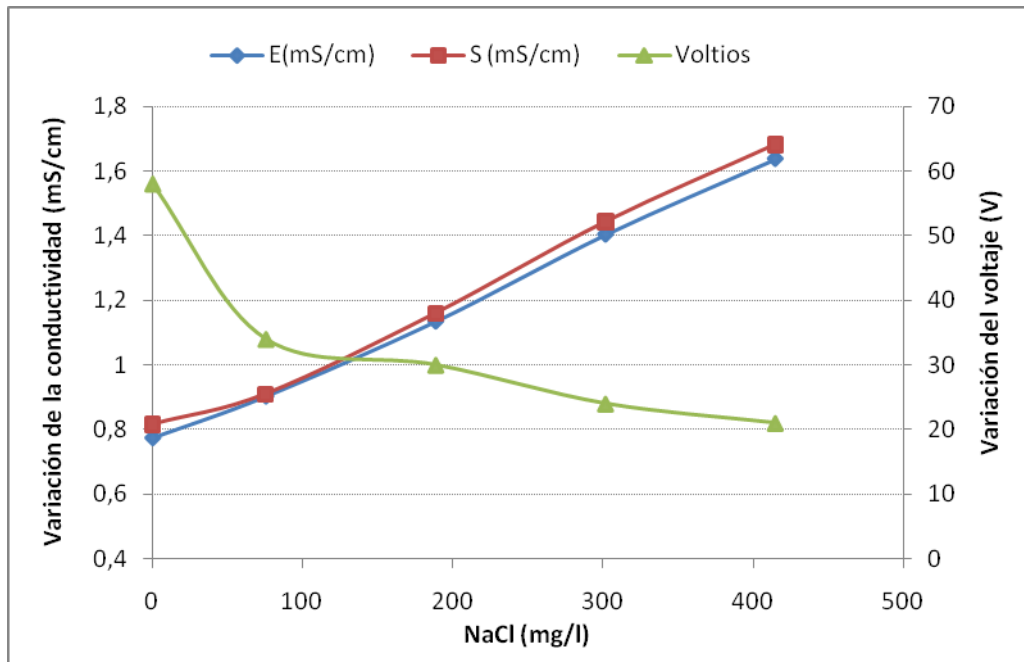


Figura 7.76. Variación de la conductividad y el voltaje en la celda con electrodos de aluminio

Los resultados que se muestran a continuación corresponden a los obtenidos trabajando con electrodos de hierro. La intensidad de corriente ha variado de 9 a 9,8 A durante la experimentación con los voltajes que se muestran en la tabla siguiente, que fue el que daba según se incrementaba la conductividad.

Como puede observarse en la siguiente tabla y gráfico siguientes, el porcentaje de eliminación de la DQO ha sido muy bueno de 66 % hasta un 79%.

Puede decirse que con la concentración de 75,5 mg/ de NaCl en el agua que entra a la celda de electrocoagulación se han obtenido buenos resultados en todos los parámetros investigados excepto en la turbidez, que siempre fue mayor que en el agua de entrada.

Cuando se trabajó 23 y 35 V, el agua que salía de la celda de electrocoagulación era de color verdoso oscuro con abundantes partículas que se iban agrupando, según pasaba el tiempo, formándose los coágulos que precipitaban. En este caso, en la solución el hierro estaba presente en estado ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) que, según pasaba el tiempo, debido a su inestabilidad, se oxidaba y el agua del decantador se tornaba de color naranja, es decir, que el Fe II pasaba a Fe III por acción del oxígeno del aire, formándose los hidróxidos insolubles y quedando en el agua partículas muy pequeñas que no decantaban siendo los responsables de la turbidez y el incremento de los SS en

el clarificado. A 19 V, el agua que salía al decantador era de color verde claro, que rápidamente pasaba a color naranja, como se ha explicado anteriormente.

NaCl (mg/l)	DQO (%)	SST (%)	P-total (%)	N-Total (%)	Turbidez (%)
75,47	79,2	73,3	98	69,2	0
188,68	73,9	48,8	91,7	35,7	0
301,89	66,7	51,6	100	21,4	0
415,09	66,7	26,1	100	41,7	0

Tabla 7.147. Resultados obtenidos en la reducción de la DQO, SS, P-total, N-total, turbidez, trabajando con **electrodos de hierro**, modificando la conductividad del agua de entrada a las celdas.

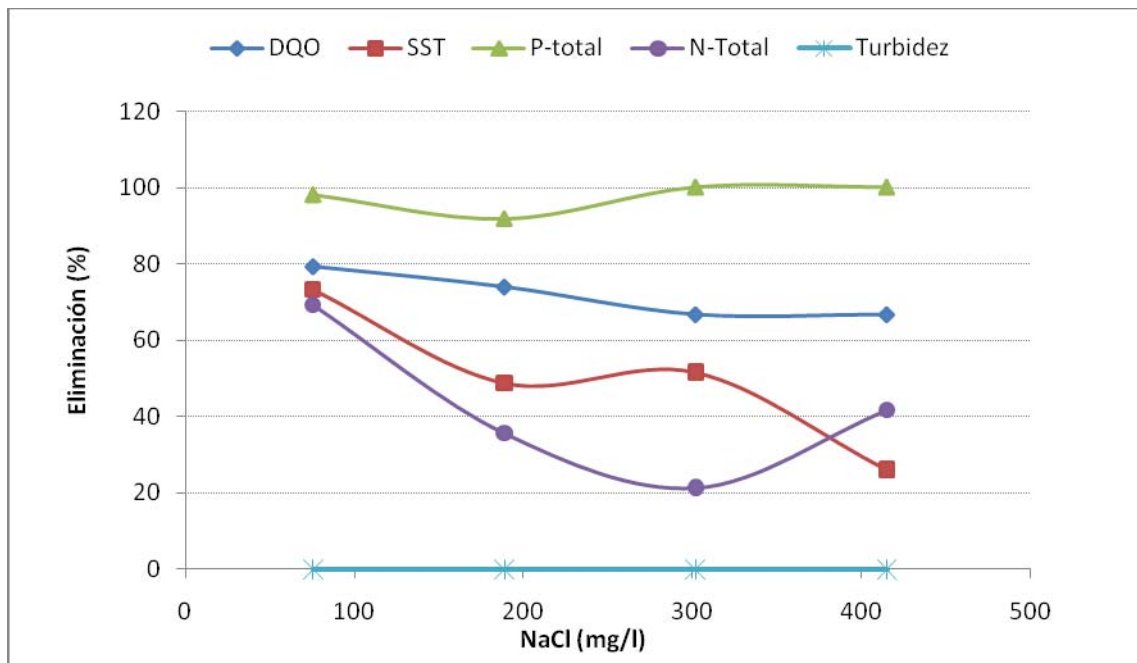


Figura 7.77. Rendimiento en la eliminación de la DQO, SS, P-total, N-total, y turbidez en función de la concentración de NaCl y el voltaje, con electrodos de hierro.

En la tabla y gráfico siguientes se muestran el incremento de la conductividad del agua procedente del decantador secundario que sirve de alimento a la planta piloto al adicionar cloruro de sodio como electrolito. Se observa, además, que el voltaje disminuyó de 35 a 19 voltios. Y el consumo de energía eléctrica ha bajado desde 1,74 kWh/m<sup>3</sup> con 35 voltios hasta 0,946 kWh/m<sup>3</sup> con 19 voltios.



NaCl (mg/l)	Voltios	Entrada (mS/cm)	Salida (mS/cm)
0,0	55	0,774	0,827
75,47	35	0,901	0,91
188,68	26	1,166	1,169
301,89	23	1,431	1,454
415,09	19	1,676	1,719

Tabla 7.148. Modificación de la conductividad y el voltaje en la celda con electrodos de **hierro**.

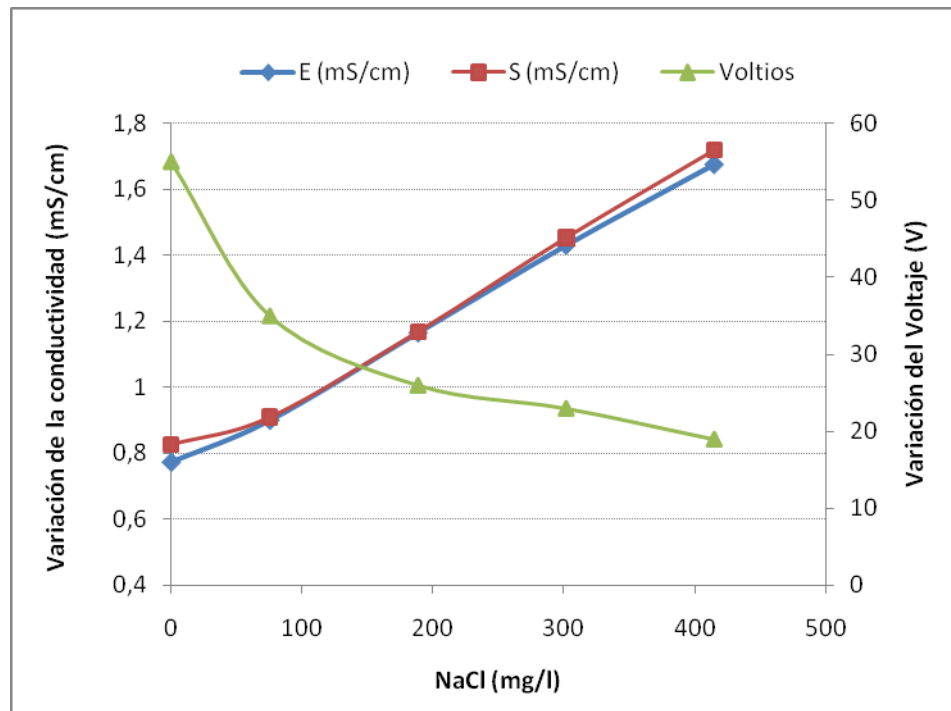


Figura 7.78. Variación de la conductividad y el voltaje en la celda con electrodos de **hierro**

La tabla y gráfico siguientes muestran los rendimientos obtenidos en la eliminación de coliformes totales y E. Coli en la presente investigación, utilizando electrodos de aluminio con diferentes concentraciones de NaCl. Se puede observar que a 34 V, 9 A y 75,4 mg/l de NaCl, se alcanza una reducción de 4 décadas logarítmicas de coliformes totales y de E. Coli. A 30 y 24 V con 9,8 A, se reducen 3 décadas logarítmicas de coliformes totales y de 4 décadas logarítmicas de E. coli. A 21 V, la reducción es de menor cuantía.

Según la normativa de reutilización, anteriormente mencionada. El agua obtenida mediante el proceso de electrocoagulación usando electrodos de aluminio cumplen los requisitos exigidos por la norma para todos los usos, excepto para los que restringen a 0 UFC/100 ml de E. Coli.

NaCl (mg/l)	Coliformes T. Entrada	E. Coli Entrada	Coliformes T. Salida	E. Coli Salida	Voltios
75,47	4,00E+06	1,20E+05	1,24E+02	1,50E+01	34
188,68	3,25E+05	8,00E+04	2,01E+02	3,10E+01	30
301,89	5,50E+05	1,25E+05	1,94E+02	3,30E+01	24
415,09	5,70E+05	1,20E+05	3,10E+03	6,50E+02	21

Tabla 7.149. Resultados promedios de Coliformes totales y E. Coli en el agua de entrada y a la salida de la celda de aluminio, adicionando NaCl como electrolito.

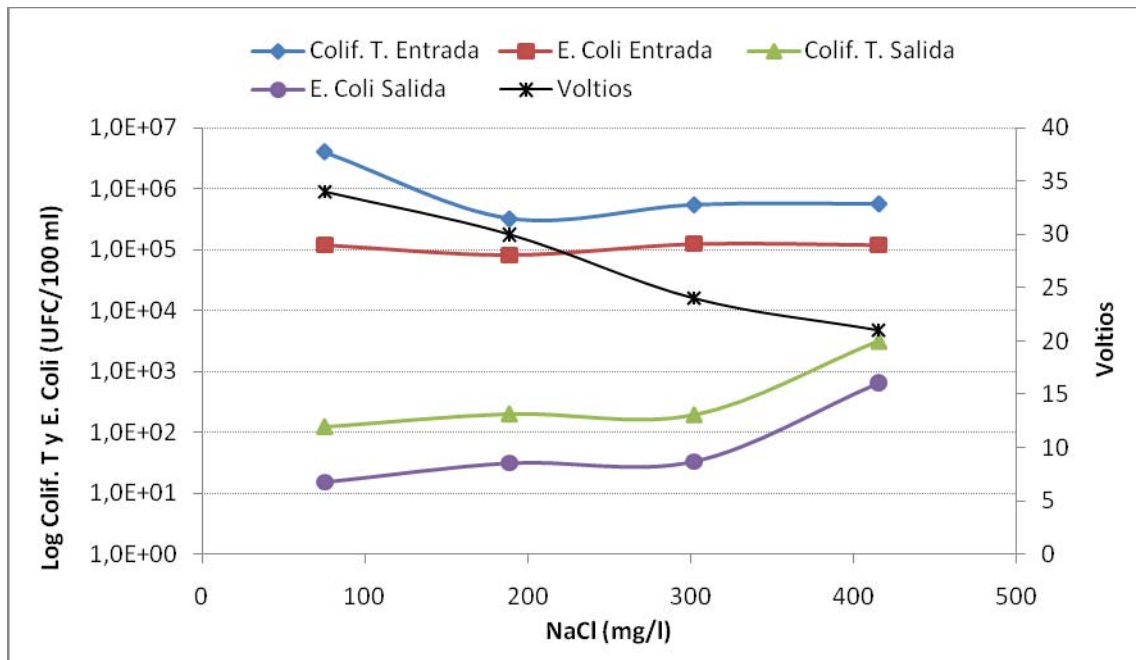


Figura 7.79. Cantidad logarítmica de Coliformes totales y E. Coli en función del voltaje y concentración NaCl, tanto en el agua de entrada como a la salida de la celda de aluminio.

La tabla y gráfico siguientes muestran los rendimientos obtenidos en la eliminación de coliformes totales y E. Coli en la presente investigación utilizando electrodos de hierro con diferentes concentraciones de NaCl. Se puede observar que a 35 V, 9 A y 75,4 mg/l de NaCl, se alcanza una reducción de 4 décadas logarítmicas de coliformes totales y 5 décadas logarítmicas de E. Coli. A 26 y 23 V con 9,8 A, se reducen 3 décadas logarítmicas de coliformes totales y de 4 décadas logarítmicas de E. coli. A 19 V, lo reducción es de menor cuantía.

Según la normativa de reutilización, anteriormente mencionada. El agua obtenida mediante el proceso de electrocoagulación usando electrodos de hierro cumplen los requisitos exigidos por la norma para todos los usos, excepto para los que restringen a 0 UFC/100 ml de E. Coli.

NaCl (mg/l)	Coliformes T. Entrada	E. Coli Entrada	Coliformes T. Salida	E. Coli Salida	Voltios
75,47	4,00E+06	1,20E+05	1,04E+02	7,00E+00	35
188,68	3,25E+05	8,00E+04	1,79E+02	1,10E+01	26
301,89	5,50E+05	1,25E+05	2,71E+02	2,30E+01	23
415,09	5,70E+05	1,20E+05	3,75E+03	4,30E+02	19

Tabla 7.150. Resultados promedios de Coliformes totales y E. Coli en el agua de entrada y a la salida de la celda de hierro, adicionando NaCl como electrolito.

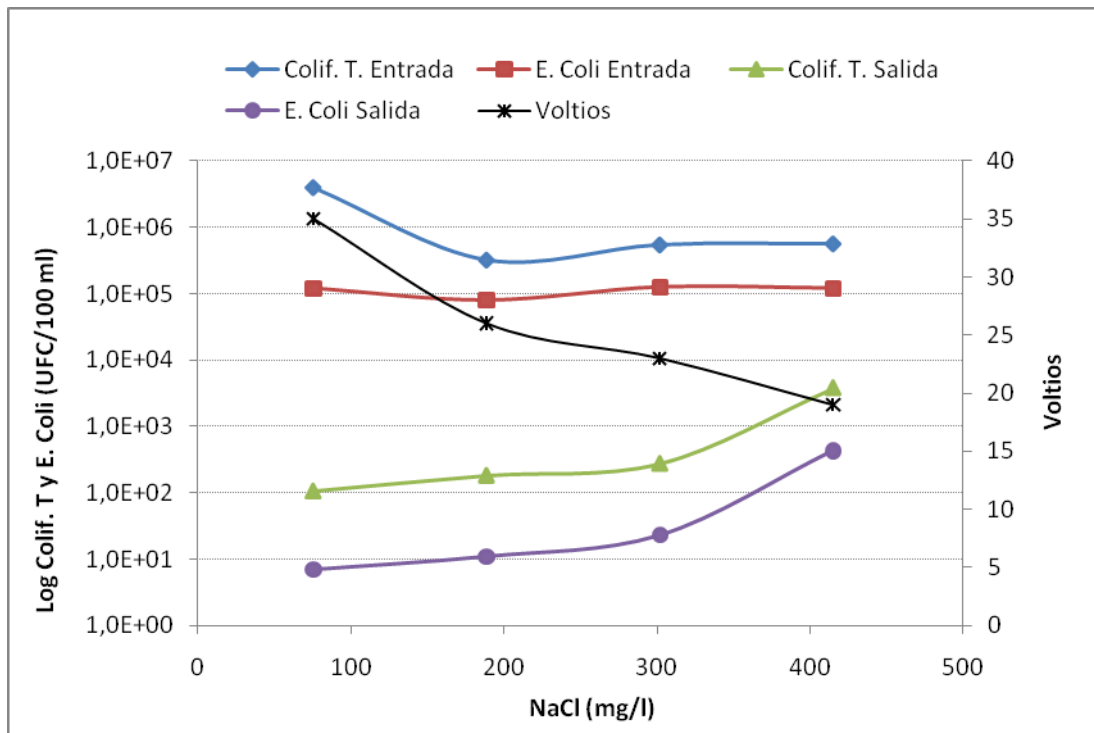


Figura 7.80. Cantidad logarítmica de Coliformes totales y E. Coli en función del voltaje y concentración NaCl, tanto en el agua de entrada como a la salida de la celda de hierro.

#### Conclusiones:

- C-112 Al modificar la conductividad, el porcentaje de eliminación de la DQO ha variado desde 58 % hasta un 78%. Mientras que sin modificar la conductividad a esta misma intensidad de corriente la eliminación de la DQO fue del 70%, y la eliminación del nitrógeno y la turbidez fue ligeramente menor en comparación cuando se modificó la conductividad.
- La concentración efectiva de NaCl en el agua que entraba a la celda de electrocoagulación estaba entre 180 -300 mg/l. Con dichas concentraciones se han logrado altos

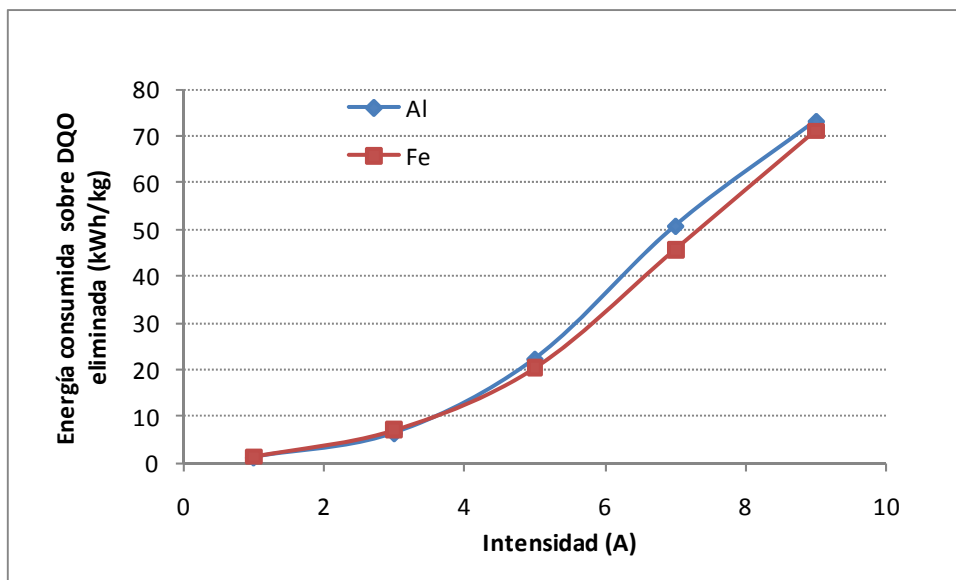
rendimientos en DQO, SS, fósforo, nitrógeno y turbidez. Además con reducción del voltaje, y por tanto en el consumo de energía eléctrica.

- C-113 Con electrodos de aluminio, la conductividad del agua procedente del decantador secundario, que sirve de alimento a la planta piloto, al adicionar cloruro de sodio como electrolito. Se observa además que el voltaje disminuyó de 34 a 21 voltios. Y el consumo de energía eléctrica ha bajado desde 1,54 kWh/m<sup>3</sup> con 34 voltios hasta 1,045 kWh/m<sup>3</sup> con 21 voltios.
- C-114 Con electrodos de hierro, se observa el incremento de la conductividad del agua procedente del decantador secundario, que sirve de alimento a la planta piloto, al adicionar cloruro de sodio como electrolito. Se observa, además, que el voltaje disminuyó de 35 a 19 voltios. Y el consumo de energía eléctrica ha bajado desde 1,74 kWh/m<sup>3</sup> con 35 voltios hasta 0,946 kWh/m<sup>3</sup> con 19 voltios.
- C-115 Con electrodos de hierro, los rendimientos obtenidos en la eliminación de coliformes totales y E. Coli, con diferentes concentraciones de NaCl. Se puede observar que a 34 V, 9 A y 75,4 mg/l de NaCl, se alcanza una reducción de 4 décadas logarítmicas de coliformes totales y de E. Coli. A 30 y 24 V con 9,8 A, se reducen 3 décadas logarítmicas de coliformes totales y de 4 décadas logarítmicas de E. coli. A 21 V, la reducción es de menor cuantía.
- C-116 Según la normativa de reutilización, anteriormente mencionada. El agua obtenida mediante el proceso de electrocoagulación usando electrodos de aluminio cumplen los requisitos exigidos por la norma para todos los usos, excepto para los que restringen a 0 UFC/100 ml de E. Coli.
- C-117 En la eliminación de coliformes totales y E. Coli en la presente investigación utilizando electrodos de hierro con diferentes concentraciones de NaCl. Se puede observar que a 35 V, 9 A y 75,4 mg/l de NaCl, se alcanza una reducción de 4 décadas logarítmicas de coliformes totales y 5 décadas logarítmicas de E. Coli. A 26 y 23 V con 9,8 A, se reducen 3 décadas logarítmicas de coliformes totales y de 4 décadas logarítmicas de E. coli. A 19 V, lo reducción es de menor cuantía.
- C-118 Con electrodos de hierro, Según la normativa de reutilización, anteriormente mencionada. El agua obtenida mediante el proceso de electrocoagulación usando electrodos de hierro cumplen los requisitos exigidos por la norma para todos los usos, excepto para los que restringen a 0 UFC/100 ml de E. Coli.

- **Estudio energético del proceso de electrocoagulación. (Objetivo 3.1.5)**

El costo del proceso de electrocoagulación depende, principalmente, del consumo de los electrodos de sacrificio y de la energía eléctrica. El cual económicamente presenta ventajas frente a otros procesos para conseguir el mismo fin.

Los gráficos siguientes se muestran la energía consumida para eliminar 1 kg de DQO mediante el proceso de electrocoagulación. Como puede verse en ambos gráficos, la diferencia de consumo energético entre ambos electrodos es mínima, ya sea con placa intermedia o sin placa intermedia.



*Figuras 7.81. Consumo de energía sobre la DQO eliminada en función de la intensidad, con electrodos de aluminio y hierro con placas intermedias.*

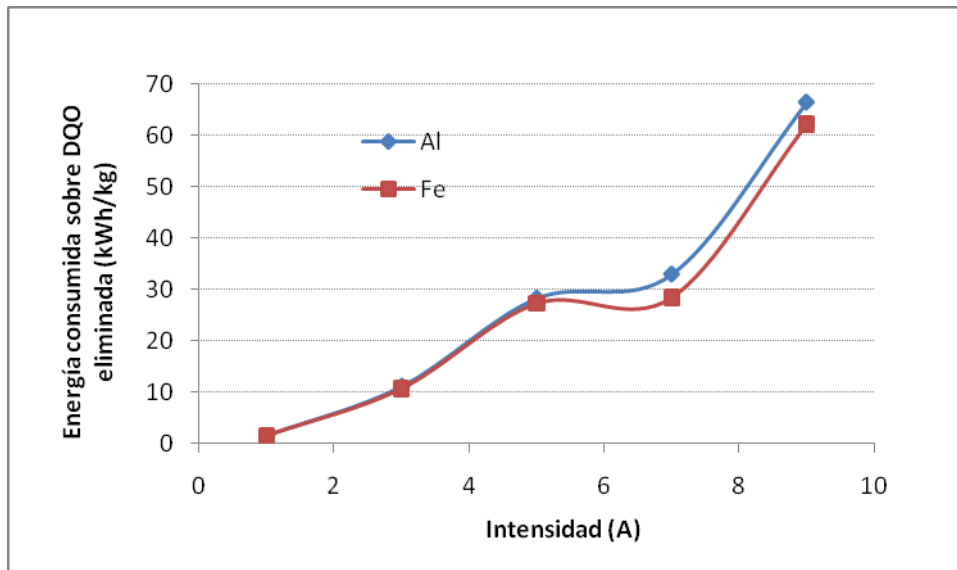


Figura 7.82. Consumo de energía sobre la DQO eliminada en función de la intensidad, con electrodos de hierro y aluminio sin placa intermedia.

El gráfico siguiente se muestra la energía consumida para eliminar 1 kg de DQO mediante el proceso de electrocoagulación usando como cátodo grafito y como ánodo aluminio o hierro. Como puede verse, el consumo energético entre ambos electrodos es semejante. Excepto el último valor que difiere ligeramente.

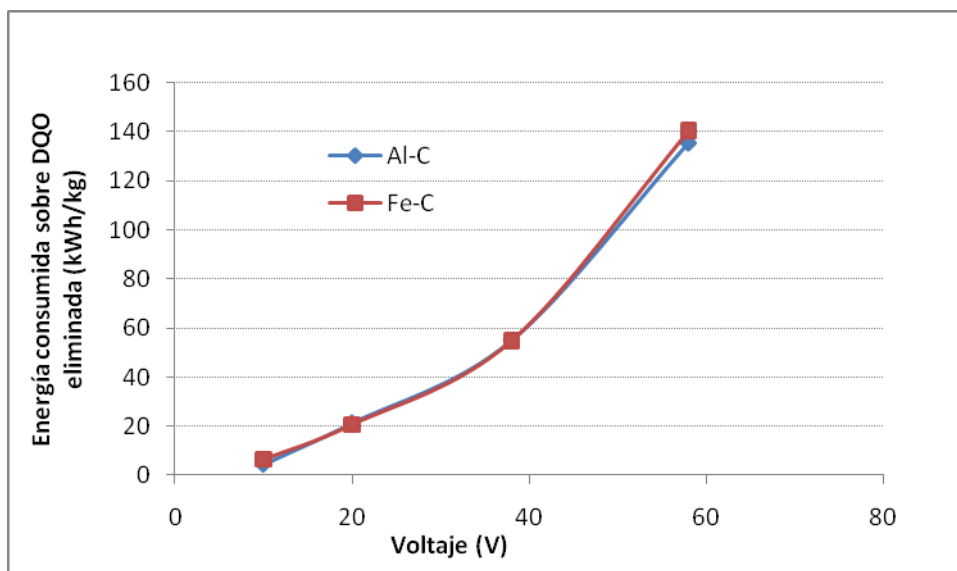


Figura 7.83. Consumo de energía sobre la DQO eliminada en función de la intensidad, con electrodos de hierro-grafito y aluminio-grafito.

En el gráfico siguiente, se observa que el consumo energético adicionando un electrolito disminuye considerablemente. También se ve que con electrodos de aluminio y a concentraciones de entre 250 y 350 mg/l de NaCl, el consumo energético es menor para eliminar 1 kg de DQO mediante el proceso de electrocoagulación.

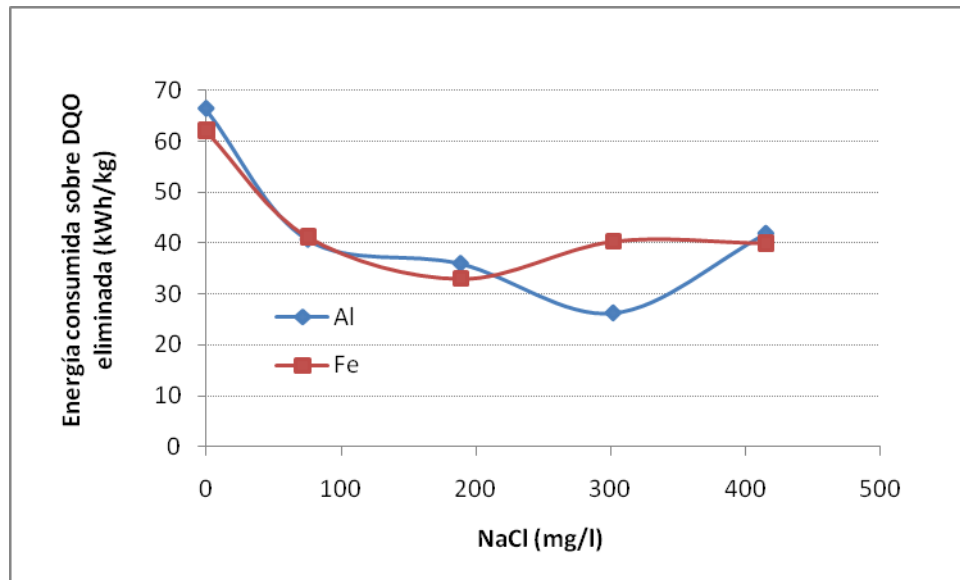


Figura 7.84. Consumo de energía sobre la DQO eliminada en función de la concentración de NaCl (mg/l), trabajando a una intensidad de corriente de 9 A.

Conclusiones:

C-119 El costo del proceso de electrocoagulación depende, principalmente, del consumo de los electrodos de sacrificio y de la energía eléctrica. El cual económicamente presenta ventajas frente a otros procesos para conseguir el mismo fin.

La energía consumida para eliminar 1 kg de DQO, mediante el proceso de electrocoagulación, para los electrodos de aluminio y hierro es prácticamente la misma. La diferencia de consumo energético entre ambos electrodos es mínima, ya sea con placa intermedia o sin placa intermedia.

C-120 El consumo de energía sobre la DQO eliminada en función de la intensidad, con electrodos de hierro-grafito y aluminio-grafito, queda reflejado en el gráfico siguiente.

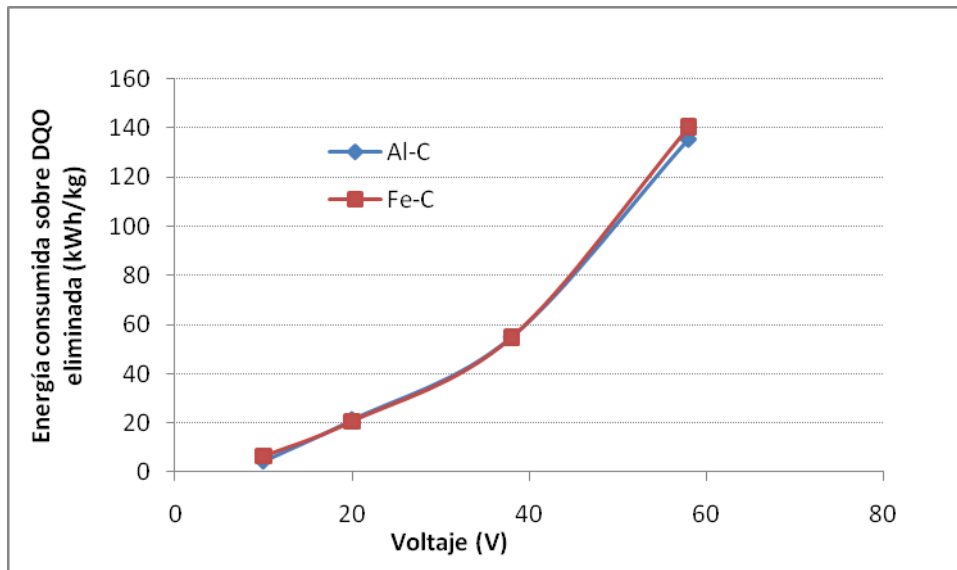


Figura 7.85. Consumo de energía sobre la DQO eliminada en función de la intensidad, con electrodos de hierro-grafito y aluminio-grafito.

C-121 Se observa que el consumo energético, adicionando un electrolito, disminuye considerablemente. También se ve que, con electrodos de aluminio y a concentraciones de entre 250 y 350 mg/l de NaCl, el consumo energético es menor para eliminar 1 kg de DQO mediante el proceso de electrocoagulación.

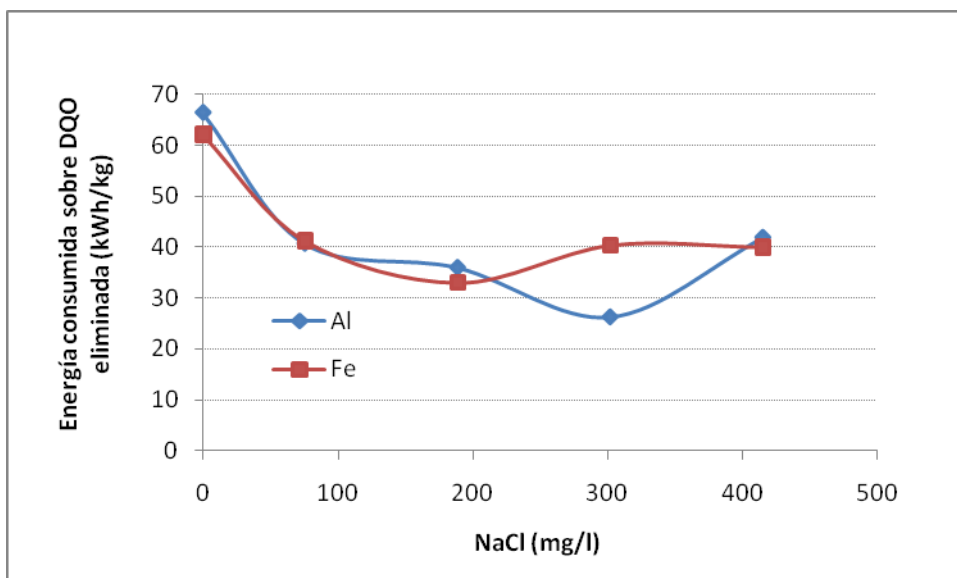


Figura 7.86. Consumo de energía sobre la DQO eliminada en función de la concentración de NaCl (mg/l), trabajando a una intensidad de corriente de 9 A.



## **CAP. 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**





## **8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **8.1. Conclusiones de los objetivos planteados**

#### **8.1.1. Conclusiones de la 1ª FASE**

La primera Fase, ensayos de laboratorio en discontinuo, batch, consistió en la puesta de contacto con la técnica de la electrocoagulación para establecer relaciones entre los parámetros que intervienen en el proceso.

Se establecen a continuación los objetivos planteados en esta Fase, y las respuestas encontradas en los ensayos realizados.

Objetivos de la Fase 1ª

***Desarrollar un trabajo de investigación, a nivel laboratorio, con el fin de optimizar los parámetros de diseño y extrapolarlo a escala piloto.***

C-1 La eliminación de sulfatos y nitratos (52% y 68%, es notable a voltajes e intensidad de corriente altos, (40 V, 31 A/m<sup>2</sup>).

C-2 A voltajes elevados se produce elevación de la temperatura significativa.

C-3 Se produce un incremento significativo del pH, dándose el efecto contrario para voltaje e intensidad bajos, (3 V, 1 A/m<sup>2</sup>)

C-4 Descenso de la conductividad entre el 10% y el 25%.

C-5 La eliminación de fosforo en fosfatos (50%) es notable a voltajes de 35 V e inferior a 12 A/m<sup>2</sup>.

C-8 La eliminación de sulfatos, nitratos y fosforo en fosfatos es prácticamente nula, variando el voltaje y la intensidad entre 12 y 200 V, y (19 y 320 A/m<sup>2</sup>).

C-9 A voltajes elevados se produce elevación de la temperatura significativa.

C-10 La alcalinización varía ligeramente entre 12 y 200 V, y (19 y 320 A/m<sup>2</sup>).

C-11 Con reducción de la DQO, entre el 37% y el 50% para voltajes entre 100 y 200 V, y entre 200 y 320 A/m<sup>2</sup>.

C-12 La reducción de la conductividad entre un 5% y un 12,8%.

C-13 Se observa una ionización de Al ligera.

C-14 La eliminación de microorganismos es importante. El óptimo se ha obtenido para 50 V, y 104 A/m<sup>2</sup>, observándose la eliminación total de coliformes totales y E.coli.

C-15 La densidad de corriente aumenta, al aumentar el voltaje, al disminuir la separación entre placas.

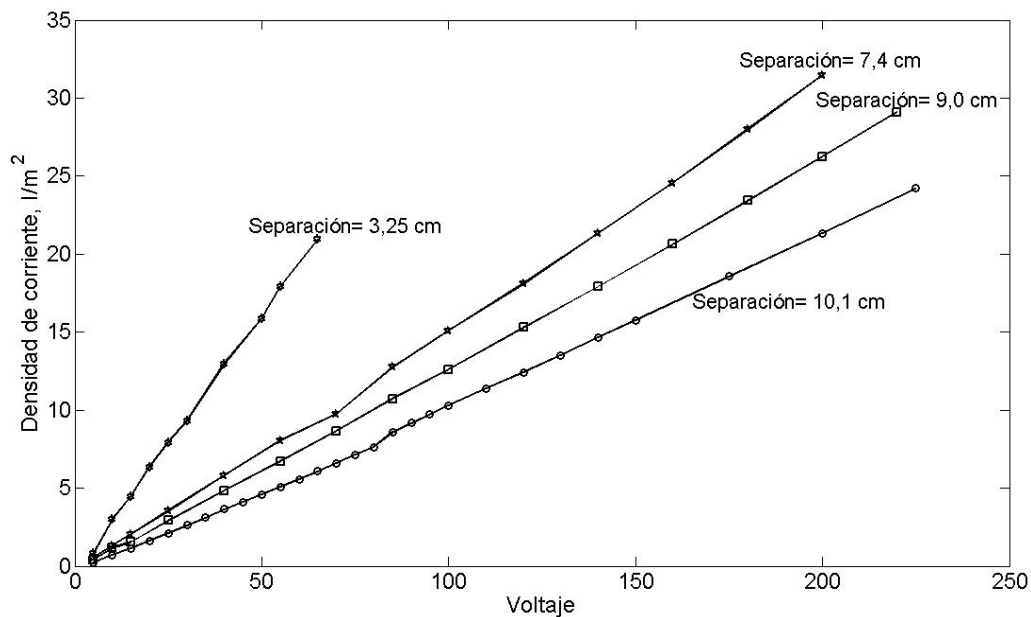


Figura 8.1. Representación de la densidad de corriente obtenida en función del voltaje y la separación de placas en la electrocoagulación.

C-16 La densidad de corriente disminuye, al aumentar la separación de placas, según una recta.

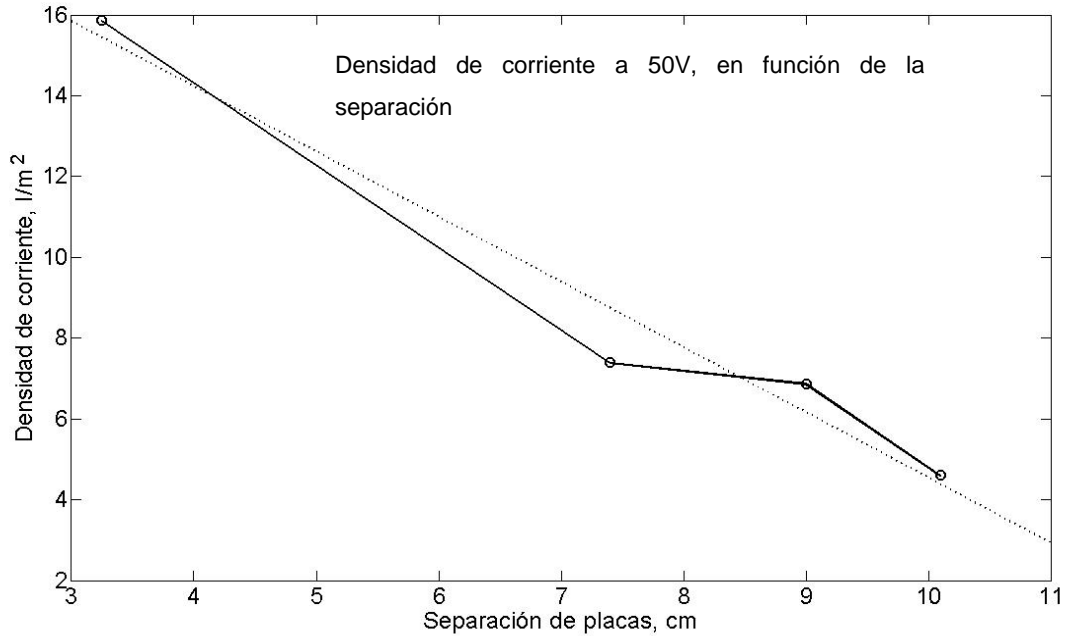


Figura 8.2. Densidad de corriente en función de la separación de las placas del electrocoagulador, a voltaje constante.

C-17 Para cada separación de placas, la temperatura del agua se incrementa al incrementar el voltaje.

C-18 El incremento de temperatura, al aumentar el voltaje, se incrementa al reducir la separación de las placas.

C-19 Al incrementar el voltaje, para cada separación de placas, la conductividad se reduce de forma leve.

**Con los resultados obtenidos, las experiencias adquiridas realizar el diseño y montaje de una planta piloto**

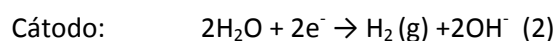
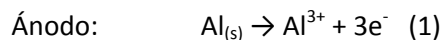
Todos los resultados obtenidos se han tenido en cuenta en el diseño de la planta piloto, pero es necesario señalar que las condiciones en discontinuo no son extrapolables al funcionamiento con caudal continuo.

***Con la investigación previa aumentar el conocimiento fisicoquímico de la electrocoagulación, sobre todo buscando su aplicación práctica. Establecer la influencia, en el proceso, de la intensidad, de la conductancia, del voltaje, de la separación de placas, de la densidad de corriente, y determinar el calor generado.***

El pH, juega un rol importante en el desarrollo de la EC. El pH óptimo está entre 5 – 9. En la presente investigación se ha podido observar que el pH del efluente, después del tratamiento por EC, se ha incrementado ligeramente en todos los casos. Esta variación ligera puede deberse a la capacidad tampón del sistema de EC, ya que hay un balance, entre la producción y consumo de iones  $\text{OH}^-$ , que impide los cambios bruscos del pH. Este efecto tampón se observó a pH cercano a 7, que fue el pH del influente que se mantenía en la planta piloto.

Cuando se trabaja con electrodos de aluminio a pH de entre 4-9, se forman especies monoméricas, como  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ;  $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$ ; y poliméricas como  $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$ ;  $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$ ;  $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ ; que finalmente se transforman en un sólido amorfo de  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , a través de la cinética de polimerización/precipitación [Bayramoglu, et al., 2007].

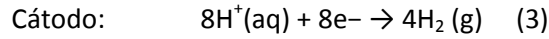
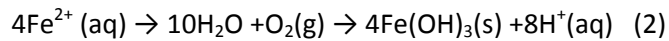
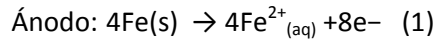
El mecanismo de reacción que se da en el ánodo y cátodo son los siguientes:



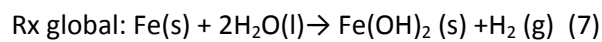
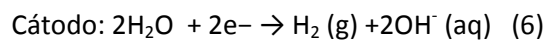
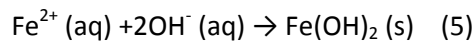
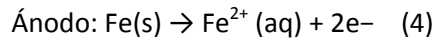
Se observó en ambos casos, tanto con electrodos de aluminio, como con los de hierro, que los flóculos eran más estables en planta piloto, en relación a la experimentación a escala laboratorio, donde muchas veces los flóculos no fueron estables. Se puede decir que los flóculos formados arrastran los contaminantes por adsorción, ya que, con carácter general, precipitan, dejando el agua bastante clarificada.

Para el caso del hierro (Fe), existen 2 mecanismos, que dependen del pH.

Primer mecanismo generación de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$



Segundo mecanismo generación del  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ :



Este segundo mecanismo se observó a intensidades de más de 5 A. En esos casos el agua que salía del electrocoagulador era de color verde, y con abundantes flóculos, que rápidamente se aglomeraban, formando coágulos más grandes y precipitando. Sin embargo el clarificado, conforme pasaba el tiempo, se oxidaba con el oxígeno del aire y se ponía de color amarillo naranja. En cambio el precipitado mantenía su color verde oscuro. El líquido sobrenadante mantenía su color amarillento, por muchas horas. Solo a las 24 horas el clarificado era transparente.

También se observó en planta piloto que cuando se trabajaba a intensidades de corriente de entre 7 y 9 A, el incremento del pH fue mayor que cuando de trabajó con menores intensidades de corriente.

Cuando se trabajó con soluciones ácidas, a nivel laboratorio, se observó una variación del pH más elevado. En cuanto a las muestras alcalinas, como eran las aguas del río Tajo, que tenía un pH inicial de 8 y después del tratamiento por EC, disminuyó a pH 7,4.

***Investigar sobre la Influencia de la electrocoagulación sobre parámetros físicos  
(pH, conductividad)***

C-3 Se produce un incremento significativo del pH, dándose el efecto contrario para voltaje e intensidad bajos, (3 V, 1 A/m<sup>2</sup>)

C-4 Descenso de la conductividad entre el 10% y el 25%.

C-7 Se produce un incremento significativo del pH para voltajes elevados, dándose el efecto contrario para voltaje e intensidad bajos, (12 V, bajando de 0,8 a 0,0 A/m<sup>2</sup>)

C-10 La alcalinización varía ligeramente entre 12 y 200 V, y (19 y 320 A/m<sup>2</sup>).

C-12 La reducción de la conductividad entre un 5% y un 12,8%.

***Investigar sobre la eficacia de la electrocoagulación en la eliminación de turbidez***

Dada la falta de extrapolación del sistema batch al sistema en continuo, este objetivo se deja para la Fase 2<sup>a</sup>.

***Investigar sobre la eficacia de la electrocoagulación en la eliminación la DQO y absorción  
UV.***

C-11 Con reducción de la DQO, entre el 37% y el 50% para voltajes entre 100 y 200 V, y entre 200 y 320 A/m<sup>2</sup>.



***Investigar sobre la eficacia de la electrocoagulación en la reducción de aniones  
(nitratos y sulfatos)***

C-1 La eliminación de sulfatos y nitratos (52% y 68% respectivamente), es notable a voltajes e intensidad de corriente altos, (40 V, 31 A/m<sup>2</sup>).

C-8 La eliminación de sulfatos, nitratos y fosforo en fosfatos es prácticamente nula, variando el voltaje y la intensidad entre 12 y 200 V, y (19 y 320 A/m<sup>2</sup>).

***Investigar sobre la eficacia de la electrocoagulación en la eliminación de cationes***

C-39 Sin placa intermedia, con placas de aluminio, la eliminación de metales se considera óptima la separación de 2,1 cm, ya que, casi con los mismos resultados, con separación de 3,1 cm se necesitaría incrementar la diferencia de potencial a 15 V. Los rendimientos en la eliminación son del: 97,9% para el cobre, 97% para el cromo, y del 100% para el níquel y el zinc.

C-40 Sin placa intermedia, con placas de hierro, con diferencia de potencial de 10 V, los rendimientos de eliminación son del: 97,4 para el cobre, 89,8% para el níquel, 96,4% para el cromo, 98,1% para el zinc. Siendo el tiempo de retención de 120 segundos.

C-41 La eliminación de metales, con diferencia de potencial de 10V, es más eficaz con placas de aluminio como electrodos.

C-53 Con electrodos de aluminio, separación entre placas de 3,1 cm, al elevar la diferencia de potencial de 10 a 40 V, no se observa ventaja alguna en la reducción de metales y fósforo.

***Investigar sobre los efectos de la electrocoagulación sobre las aguas captadas para abastecimiento, procedentes de un embalse de la Comunidad de Madrid y de una zona de aguas duras.***

Dada la falta de extrapolación del sistema batch al sistema en continuo, este objetivo se deja para la Fase 2ª.

***Investigar sobre los efectos de la electrocoagulación sobre aguas residuales depuradas.***

Dada la falta de extrapolación del sistema batch al sistema en continuo, este objetivo se deja para la Fase 2ª.

***Investigar sobre rendimientos de diferentes equipos de electrocoagulación con elementos planos.***

Dada la falta de extrapolación del sistema batch al sistema en continuo, este objetivo se deja para la Fase 2ª.

***Diseño de planta optimizada experimental de electrocoagulación.***

Dada la falta de extrapolación del sistema batch al sistema en continuo, este objetivo se deja para la Fase 2ª.

### 8.1.2. Conclusiones de la 2ª fase

Los hitos en los que se desglosó la investigación fueron los siguientes.

***Adquisición de material necesario para la investigación a escala laboratorio y planta definitiva de investigación.***

Se desarrolló de forma normal

***Puesta a punto del Laboratorio.***

Se desarrolló de forma normal

***Diseño y montaje de reactores a escala de laboratorio, primeros ensayos choques.  
Comprobación Fase 1ª.***

En una primera etapa de la investigación, se construyeron 5 celdas de vidrio, con electrodos de placas de aluminio en cuatro de ellas, y 1 celda con electrodos de hierro.

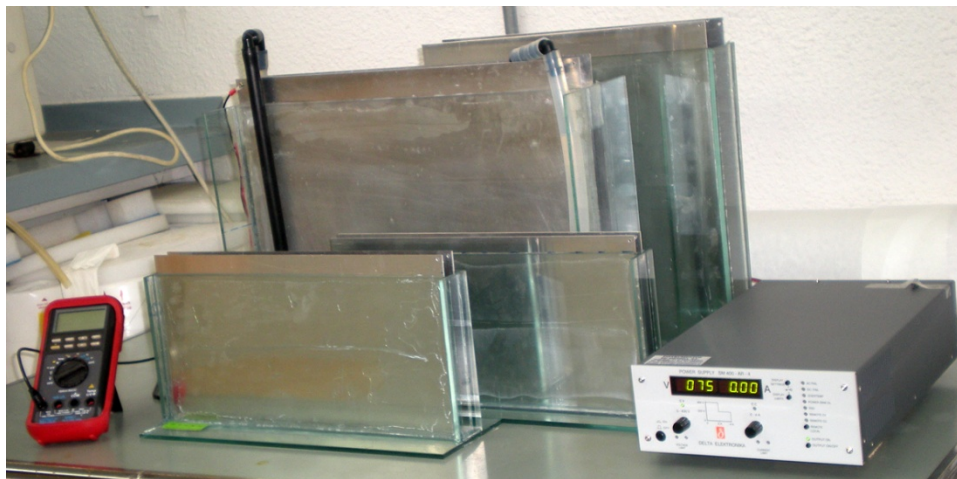


Figura 8.3. Fuente de alimentación, celdas de aluminio y multímetro electrónico.

Las dimensiones de las celdas fueron:

- Aluminio

50 cm de largo x 35 de cm alto x 3,0 cm de separación entre placas,

40 x 37 x 4,7 cm,

40 x 18 x 2,1 cm,

40 x 18 x 1,4 cm

- Hierro

40 x 17x 2,2 cm.

***Ensayos a escala de laboratorio encaminados a estudiar la influencia de las variables que intervienen en el proceso.(Repetición Fase 1ª).***

- Intensidad eléctrica
- Temperatura
- Materiales de las placas de electrodo y conductoras

Los estudios realizados en esta segunda fase, al igual que los realizados en la primera fase, experiencias en un sistema discontinuo, batch fueron dirigidos a las variables que intervienen en el proceso.

En relación con el estudio del efecto de la separación entre placas sobre la conductividad, intensidad de corriente, densidad de corriente, temperatura y voltaje. Se ha podido comprobar que a doble voltaje se tiene doble intensidad, y que existe linealidad entre voltaje y densidad de corriente como ya se ha señalado. Se concluye que a menor separación entre placas existe mayor densidad de corriente es decir a mitad separación doble densidad de corriente.

La conductividad eléctrica, como medida del contenido de iones, durante la electrocoagulación disminuyó ligeramente en todas las experiencias.

En cuanto a la temperatura se observa que a mayor voltaje la temperatura se incrementa.

Se ha podido observar también que el pH del efluente después del tratamiento por electrocoagulación se ha incrementado para todos los aguas tratadas, excepto con muestras del río Tajo, en las que disminuyó de pH 8 a 7,4.

***Ensayos a nivel de laboratorio encaminados a determinar el grado de cumplimiento de los sistemas de electrocoagulación, en relación con la normativa actual de reutilización.***

Se da respuesta en la Fase 3ª

En relación con el grado de cumplimiento de los sistemas de electrocoagulación con las normativas actuales de reutilización, referentes a los parámetros fisicoquímicos como son: SS, turbidez, nitrógeno, fósforo y metales.

En la serie de experimentos realizados se ha demostrado claramente dos resultados importantes. En primer lugar, que la densidad de corriente de funcionamiento es un parámetro clave, que no sólo afecta al tiempo de residencia del sistema, sino que también influye fuertemente en la eliminación de contaminantes. En segundo lugar, los resultados obtenidos aumentando la densidad de corriente no siempre fue acompañado de un aumento de rendimiento de eliminación de contaminantes. Para cualquier aplicación específica, la densidad de corriente invariablemente participará en la relación de los gastos operacionales y el uso eficiente del coagulante introducido.

También se observó que en el proceso de electrocoagulación tienen gran influencia el pH, tipo y concentración del contaminante, la estabilidad y peso del floculo aglomerado, que en algunos casos no se formaba la zona de compresión en el cono imhoff, los flóculos eran esponjosos y muchas veces flotaban lo que impedían obtener el clarificado.

Cuando se trató agua del decantador secundario, al aumentar el voltaje al máximo, el efluente apareció de color verdoso debido a la acumulación de iones ferrosos, lo que contribuyó al incremento de la turbidez del efluente. Por lo que se puede decir que las condiciones de operación de un sistema de electrocoagulación son altamente dependientes de las condiciones químicas, pH, tamaño de partículas del agua a tratar y especialmente de su conductividad. Por lo cual, para el tratamiento de las aguas residuales tratadas se requiere aplicaciones de voltaje bajo (<50 Voltios) con amperaje variable, de acuerdo a las características químicas del agua.

***Reducción de parámetros físicoquímicos de las aguas (SS, turbidez, nitrógeno y fósforo)***

En relación con la turbidez, utilizando como influente agua residual urbana, que tenía una turbidez > 50 NTU, el efluente tratado tenía una turbidez de 9 NTU, el rendimiento alcanzado fue en promedio de un 85%. Para aguas del río la turbidez estaba por encima de 10 NTU y se alcanzaron unos rendimientos hasta del 97%. También se observó que en algunos casos no se tenía SS, pero sí turbidez esto puede deberse a los contaminantes finos producto de la electrolisis.

En cuanto a los sólidos suspendidos (SS) en el agua residual tratada y del río, la concentración era relativamente baja alrededor de 20 mg/l, al someterle a electrocoagulación se logró reducir los SS en el rango de 50 a 100%, dependiendo de la densidad de corriente, tiempo de retención, y separación entre placas.

Referente a la DQO, se ha podido observar que la eficiencia de eliminación de la DQO ha variado de 0 a 65%, y algunas veces se ha incrementado, esto puede deberse a que, en el agua residual existen compuestos que reaccionan con el Fe(II) ó Al, y forman compuestos solubles que permanecen en la solución. También puede decirse que se debe a la fuerte oxidación del Fe (II) a Fe (III), lo que se observó a elevados voltajes, que el agua que salía del electrocoagulador era de color verde oscuro luego pasaba a color amarillo ocre, conforme pasaba el tiempo. Cuando no ocurría este fenómeno el agua clarificada era bastante limpia. Y cuando el agua, que salía del electrocoagulador era de color amarillo, el color permanecía en el clarificado, lo que puede ser debido a que algunos compuestos pueden reaccionar con el Fe (III), formando compuestos solubles. Por otro lado, en el extremo opuesto de la celda otros compuestos pueden formar con el Fe(II) compuestos solubles y con el Fe(III) compuestos insolubles. Todos ellos serán parcialmente eliminados y la eficiencia de eliminación de la DQO depende del pH final.

Mientras que con electrodos de aluminio, a elevados voltajes y mayor tiempo de retención se obtenían mejores resultados, pero los flóculos eran esponjosos, esto puede deberse al incremento del pH por encima de 8, según otros investigadores los electrodos de aluminio muestran alta eficacia en la eliminación de la DQO a valores de pH bajo, debido al único estado de oxidación del Al, así al reaccionar con compuestos orgánicos forman compuestos insolubles.

En relación con la eliminación de metales como Cu, Cr, Ni, Zn, se han obtenido buenos resultados por encima del 85% llegando hasta el 100% en algunos casos, tanto con electrodos de Al o Fe. Se llegaba a eficiencia del 100% o cercano, cuando se incrementaba el pH de la solución en el electrocoagulador, pero esto dependía del metal a eliminar y del electrodo. En resumen puede decirse que los metales se eliminan por reducción, precipitación, absorción y adsorción con hidróxidos polimérico de Fe<sup>+3</sup> o Al<sup>+3</sup>.

En cuanto a la eliminación de fósforo y nitrógeno, el rango de la eficiencia de eliminación del fósforo como fosfato estuvo entre 60 a 80%, utilizando agua sintética, mientras agua del río, la cantidad de fósforo era muy pequeño y se eliminaba al 100%. La eficacia alcanzada en la eliminación de fósforo, se debe a la precipitación con los iones Fe<sup>+3</sup> y Al<sup>+3</sup> procedentes de los electrodos, formando fosfatos insolubles. Mientras que la reducción del nitrógeno como nitrato fue mínima, solo en una ocasión se logró una eficiencia del 68%.

C-42 Se consiguen unos rendimientos del 95%, en la reducción de la turbidez, con separación de placas de 1,4 cm, diferencia de potencial de 10 V.

C-43 A igual separación se obtienen unos resultados más importantes para la eliminación de SS y DQO, elevando la diferencia de potencial a 15 V. Los rendimientos alcanzados son: 89% en SS, 94% en turbidez y 74% en DQO.

C-44 Rendimientos similares a los anteriores se consiguen elevando la separación a 2,1 cm, con diferencia de potencial de 10 v. Los rendimientos alcanzados en este caso son: 60% en SS, 92% en turbidez y 65% en DQO.

C-45 Se consiguen rendimientos bajos con aguas de salida del decantador primario, con electrodos de aluminio, con separación de 1,4 cm, diferencia de potencial 16 v, los flóculos son poco consistentes, obteniendo unos rendimientos del 46% en DQO, del 34% en SS y prácticamente nulo en turbidez. Con electrodos de hierro, con separación de 2,2 cm, diferencia de potencial 30 v, los flóculos son poco consistentes, obteniendo unos rendimientos del 50% en DQO, del 74% en SS y del 74% en turbidez.

C-46 Con aguas de salida de secundario, con tiempo de retención en la cámara de electrocoagulación, electrodos de aluminio con separación de 1,4 cm, se obtienen buenos resultados con una diferencia de potencial de 10 V, 89% en SS, 95% en turbidez y 22% en DQO. Al realizar los mismos ensayos con diferencia de potencial de 15 V, los rendimientos para SS y turbidez son prácticamente los mismos, pero se mejora la reducción de DQO hasta el 74%.

C-47 Con aguas prepotables (SS entre 12 y 20 ppm, Turbidez entre 8,98 y 14,4 NTU, y DQO entre 19 y 31 ppm), con electrodos de aluminio, con diferencia de potencial entre 15 y 150 V, y separación de placas entre 1,4 y 4,7 cm, se ha observado como características comunes la presencia de flóculos en el clarificado, llegando con el incremento de voltaje (110 – 150 V) a aparecer como especies de penachos de flóculos finos.

C-48 Con aguas prepotables (SS entre 12 y 20 ppm, Turbidez entre 8,98 y 14,4 NTU, y DQO entre 19 y 31 ppm), con electrodos de aluminio, con diferencia de potencial entre 15 y 150 V, y separación de placas entre 1,4 y 4,7 cm, se ha observado un descenso en la conductividad, que en ningún caso ha superado el 18,1%. La oscilación va entre descensos del 4,7% al 18,1%. En esta variación no se justifica sea debida a la separación entre placas, ni a la diferencia de potencial.

C-49 Con aguas prepotables (SS entre 12 y 20 ppm, Turbidez entre 8,98 y 14,4 NTU, y DQO entre 19 y 31 ppm), con electrodos de aluminio, con diferencia de potencial entre 15 y 150 V, y separación de placas entre 1,4 y 4,7 cm, se ha observado que los rendimientos más altos se consiguen en los tiempos de contacto de 2 minutos, consiguiéndose los rendimientos óptimos entre los 4 y 6 minutos de retención.

C-50 Con aguas prepotables (SS entre 12 y 20 ppm, Turbidez entre 8,98 y 14,4 NTU, y DQO entre 19 y 31 ppm), con electrodos de aluminio, con diferencia de potencial entre 15 y 150 V, y separación de placas entre 1,4 y 4,7 cm, se ha observado, en relación con la reducción de SS, que a igual separación de placas se incrementa con la elevación de la diferencia de potencial. Los rendimientos varían entre el 44% y el 89%. No se justifica la variación en rendimientos por la separación de placas.

C-51 Con aguas prepotables (SS entre 12 y 20 ppm, Turbidez entre 8,98 y 14,4 NTU, y DQO entre 19 y 31 ppm), con electrodos de aluminio, con diferencia de potencial entre 15 y 150 V, y



separación de placas entre 1,4 y 4,7 cm, se ha observado, en relación con la DQO, que no se dan variaciones significativas en relación con la separación de placas o diferencia de potencial. La variación en rendimientos varía del 23% al 69,6%.

C-52 Con aguas prepotables (SS entre 12 y 20 ppm, Turbidez entre 8,98 y 14,4 NTU, y DQO entre 19 y 31 ppm), con electrodos de aluminio, con diferencia de potencial entre 15 y 150 V, y separación de placas entre 1,4 y 4,7 cm, se ha observado, en relación con la turbidez, que no se dan variaciones significativas en relación con la separación de placas o diferencia de potencial. La variación de rendimientos puede fijarse entre el 92,5% y el 98,1%.

***Reducción de la contaminación biológica de las aguas (E. coli), legionella, nematodos y tenia.***

Se puede decir que los microorganismos han sido inactivados electroquímicamente, ó mediante la generación agentes eliminadores como los OH<sup>-</sup> que se generan en las reacciones electroquímicas. Una tercera vía de reducción en la concentración de E. coli y coliformes totales en la suspensión puede ser debido a la electrosorción de las bacterias y su depósito (o fijación) sobre la superficie de los electrodos, y por consiguiente su desactivación. En algunas experiencias, a bajo voltaje, se observó que a mayor tiempo de retención se encontró mayor concentración de microorganismos, que tiempos más cortos. Ésto puede ser debido a que parte de la bacteria puede regresar a la suspensión.

Por lo tanto las conclusiones son:

- La reducción de E. coli y coliformes totales en la desinfección electroquímica utilizando electrodos de hierro fue de tres décadas logarítmicas.
- Utilizando electrodos de aluminio la reducción de ambos microorganismos fue de 1 década logarítmica.

C-54 Con electrodos de aluminio, con diferencias de potencial entre 16 y 50 V, se observa una reducción escasa de coliformes totales y de E.coli, aunque incrementándose con el tiempo de actuación.

C-55 Con electrodos de hierro, separación de placas de 2,2 cm, diferencia de potencial 30 v., se obtuvo una eliminación importante de 3 décadas logarítmicas tanto en coliformes totales como de E. coli.

***Ensayos a nivel de laboratorio encaminados a determinar el rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación en relación con la modificación de la dureza del agua***

Para observar la variación de la dureza del agua y como se ve afectada mediante el sistema de electrocoagulación se creyó conveniente traer muestra de agua con elevada dureza, y éstas características lo aporta el agua del río Tajo, que se muestreó a la altura de Aranjuez. En el anejo 2 se muestran los datos antes y después del tratamiento mediante electrocoagulación, utilizando una celda con placas de aluminio de 1,4 cm de separación entre placas y una celda de hierro de 2,2 cm de separación entre placas.

Por su elevada conductividad y pH del agua, el voltaje aplicado con que se podía trabajar con las celda de aluminio fue de hasta 12V, obteniéndose una reducción del 54% a 10V, y de 58% a 12V. Mientras que con electrodos de hierro la reducción fue del 10% a 10V y del 30% a 14V.

La explicación a la ligera bajada del pH durante la EC del agua del Tajo, se justifica que en el balance de generaciones de OH<sup>-</sup> según la reacción ( $Al^{3+} + 3 OH^{-} \rightarrow Al(OH)_3$ ), por la disolución del aluminio y la generación de ácidos causados por la EC de esta agua que contiene entre otros componentes 550, 180, y 130 mg/l de sulfatos, bicarbonatos, y cloruros respectivamente, que a su vez generan parcialmente H<sup>+</sup> en sus reacciones en el ánodo, predominando ligeramente sobre los iones OH<sup>-</sup> generados por disolución del Al.

C-58 En todos los ensayos se produjo una disminución de la dureza total, dureza cálcica, y alcalinidad tanto con electrodos de aluminio como de hierro. En sistema batch los rendimientos son mínimos, mientras que, con caudal circulante, la reducción de la dureza total ha sido aproximadamente del 55 %, mientras que para los demás parámetros, la variación ha sido de menor cuantía, utilizando electrodos de aluminio, variando el voltaje, a 10 V y 12 V.

C-59 Con electrodos de hierro, separación de placas de 2,2 cm, con caudal circulante, la reducción de la dureza total, dureza cálcica y alcalinidad, variando el voltaje, a 10 V y 14 V., ha sido muy ligera.

***Ensayos a nivel de laboratorio encaminados a determinar el rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación en relación con la modificación de la conductividad de las aguas efluentes del secundario.***

En relación con el rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación con la modificación de la conductividad de las aguas efluentes del secundario. La conductividad decrecía ligeramente tanto al aumentar el voltaje como el tiempo de retención. Se ensayó con agua del decantador secundario y agua del río Manzanares.

También se ha podido comprobar que la conductividad afecta fuertemente el voltaje de la electrólisis. Cuando la conductividad se incrementó a 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , el voltaje fijado de 50V entre electrodos, éste decreció hasta 10V, para una separación entre placas de 1,4 cm. Y para placas de mayor separación el voltaje aplicado decrecía a 12 V. A este respecto, se puede decir que la densidad de carga es un factor primario que afecta la eliminación de contaminantes.

C-60 Con electrodos de aluminio, separación de placas de 2,2 cm, con caudal circulante, se han establecido las variaciones de la densidad de corriente, en relación con la diferencia de potencial y la conductividad del agua.

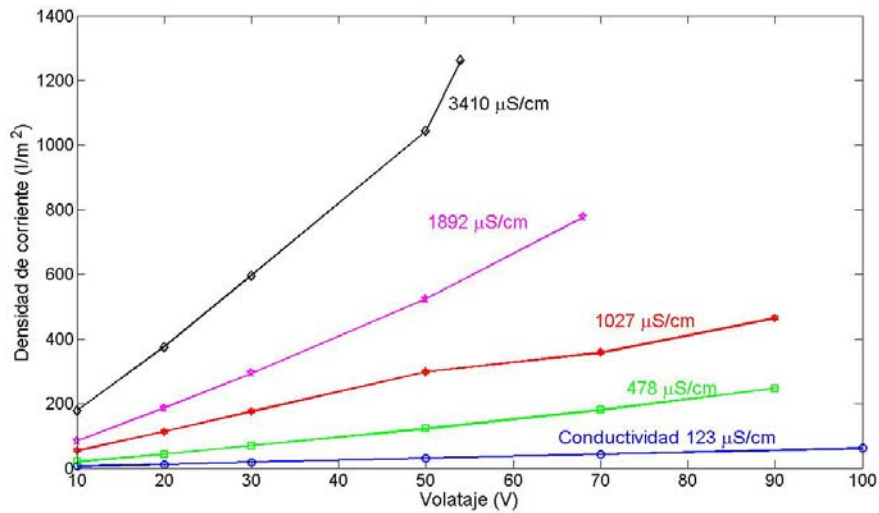


Figura 8.4. Representación de la densidad de corriente obtenida en función del voltaje y la separación de placas en la electrocoagulación.

**Diseño definitivo de la planta piloto para desarrollo experimental con caudal circulante en continuo.**

C-61 Uno de los parámetros básicos de diseño, a escala piloto, es la relación de superficie electrolytica sobre el volumen de la disolución o del reactor, a escala laboratorio (A/V), que es una medida del potencial para la liberación de coagulante y burbujas a un sistema (sobre una base volumétrica). La densidad de corriente, definida como la corriente por un área activa de electrodo, es otro parámetro de diseño de escala utilizado.

C-62 Relacionando el rendimiento de la eliminación de la DQO con el tiempo de electrocoagulación, en todos los reactores antes mencionados, se determinó un (A/V) óptimo. Para nuestro caso fue de 21,27 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, y una densidad de corriente de 95,61 A/m<sup>2</sup>, con un tiempo de electrocoagulación de 4 minutos. Para la misma relación (A/V), y un tiempo de electrocoagulación de 6 minutos se obtiene una densidad de corriente de 68,29 A/m<sup>2</sup>. En ambos casos el rendimiento de eliminación de la DQO fue próximo a 70% y además se consiguió una eliminación de la turbidez del 91%. Se ha partido de estas relaciones de escala porque los contaminantes y el tipo de reactor son similares.

C-63 La relación (A/V) = 21,27 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, y densidad de corriente de 68,29 A/m<sup>2</sup>, a nivel laboratorio, permitió determinar la masa de aluminio disuelto por el proceso de

electrocoagulación, que fue de 6,36 mg/m<sup>2</sup> área del electrodo, determinado según la ecuación  $m$  (gramos Al<sup>3+</sup>) =  $Q M/nF$ . Con esta relación se trabajó hasta una densidad de corriente de 196 A/m<sup>2</sup>. Donde  $Q$  es la cantidad de electricidad que pasa por la celda en un determinado tiempo,  $M$  es el peso molecular del Al,  $n$  es el número de electrones intercambiados por la molécula o ión de sustancia,  $F$  es la constante de Faraday (96488 Culombios/mol).

Considerando todo lo anterior se ha realizado el diseño de la planta piloto, cuyo plano, que aparece a continuación. El volumen de agua a tratar se pasa secuencialmente a través de un depósito de pretratamiento, un depósito de procesamiento electroquímico, un depósito de post-tratamiento, que puede pasar a un decantador o a un depósito de flotación.

El depósito de pretratamiento estaba dotado de un mecanismo de agitación, quedando conectados al mismo 3 depósitos de reactivos. En este depósito de pretratamiento se pueden ajustar el pH y la conductividad a valores apropiados para conseguir la optimización del tratamiento electroquímico.

El depósito de procesamiento electroquímico, electrocoagulador, esta conectado a una fuente de energía, básicamente consiste en un depósito abierto cuyas caras laterales y el fondo están ranuradas con el fin de trabajar con distintas distancias entre electrodos.

El electrocoagulador se diseñó para su construcción en metacrilato con unas dimensiones internas de 27,5 x 49,5 x 49,5 cm.

En una primera serie de experimentos se establecerían 4 placas de electrodo, 2 cátodos y 2 ánodos, y 3 placas intermedias, todas de aluminio, como se muestra en la figura siguiente. De la misma forma se trabajó en la segunda línea, pero con placas de hierro. Las dimensiones de las placas de aluminio fueron de 250 x 500 x 1,5 mm, igual que las placas de hierro, pero con separación de electrodos de 1,0 mm. El área efectiva total fue de 37,7 cm x 21,7 cm = 818,1 cm<sup>2</sup>, y el espacio entre electrodos de 4,75 cm.

Los electrodos se conectan a una fuente de alimentación, que tiene una salida variable entre 300 V y 10 A.

### 8.1.3. Conclusiones de la 3ª fase

La tercera fase comenzó con la construcción, montaje y pruebas de la planta piloto para 144 l/h. Continuándose con los ensayos previstos para la 3ª Fase.

Se establecen a continuación los objetivos planteados en esta 3ª fase, y las respuestas encontradas en los ensayos realizados.

Las placas utilizadas son aquellas que, estudiadas en las investigaciones estudiadas en la investigación bibliográfica, tienen un precio reducido. Así se utilizan en la investigación placas de aluminio, hierro, acero y grafito.

***Construcción de la planta experimental, realizando gestiones para su instalación en la planta depuradora de aguas residuales de Viveros.***

La conclusión en este sentido queda validada con la construcción y puesta en marcha de la planta piloto ya ampliamente descrita en apartados anteriores.

***Profundizar en el conocimiento de la tecnología de electrocoagulación, estudiando la influencia de las siguientes variables en el proceso:***

- ***Intensidad eléctrica.***
- ***Caudal del agua tratada.***
- ***Tiempo de retención***
- ***Variación del pH.***
- ***Temperatura.***
- ***Materiales de las placas de electrodo y conductoras.***
- ***Combinación de las placas de electrodos y conductoras.***

En relación con el estudio de la influencia de las variables que intervienen en el proceso de electrocoagulación en un sistema continuo.

La conductividad eléctrica, como medida del contenido de iones, durante la electrocoagulación disminuyó ligeramente en todas las experiencias utilizando placas intermedias. Mientras que sin placa intermedia a altas intensidades de corriente de 7 y 9 A, aumentó ligeramente tanto con electrodos de aluminio como de hierro. Con las demás intensidades disminuyó ligeramente, como puede observarse en los resultados que se presentan en el anejo 2.

En cuanto a la temperatura se observa que a mayor voltaje la temperatura se incrementa. El incremento no fue muy acusado, lo máximo que aumentó fue en 3 grados, con la máxima intensidad de corriente.

El pH, juega un rol importante en el desarrollo de la EC. Según investigaciones realizadas el pH óptimo está entre 5 – 9. En la presente investigación se ha podido observar que el pH del efluente después del tratamiento por EC se ha incrementado ligeramente en todos los casos. Esta variación ligera puede deberse a la capacidad tampón del sistema de EC, ya que hay un balance entre la producción y consumo de iones OH<sup>-</sup>, el cual impide los cambios bruscos del pH. Este efecto tampón se observó a pH cercano a 7, que fue el pH del influente. Cuando se trabajó con intensidades de 7 y 9 A, el incremento del pH fue mayor que cuando se trabajó con menores intensidades de corriente.

En relación a la densidad de corriente, podemos concluir que ésta tiene un gran efecto en el proceso de EC. A altas densidades de corriente, la disolución anódica de los materiales de electrodo (Al ó Fe) se incrementa generando gran cantidad de coagulante para la eliminación de los contaminantes. Así mismo se observó un incremento de generación de burbujas (H<sub>2</sub>) que eliminaba la materia suspendida por flotación.

En la serie de experimentos realizados se ha demostrado claramente dos resultados importantes: En primer lugar, que la densidad de corriente de funcionamiento es un parámetro clave, que no sólo afecta al tiempo de residencia del sistema, sino que también influye fuertemente en la eliminación de contaminantes. En segundo lugar, los resultados obtenidos aumentando la densidad de corriente no siempre fueron acompañados de un aumento de rendimiento de eliminación de contaminantes. Para cualquier aplicación específica, la densidad de corriente invariablemente participará en la relación de los gastos operacionales y el uso eficiente del coagulante introducido.

**Verificar el grado de cumplimiento de los sistemas de electrocoagulación respecto a las normativas actuales de reutilización.**

- **Reducción de parámetros físico-químicos de las aguas (SS, turbidez, nitrógeno y fósforo).**
- **Reducción de la contaminación biológica de las aguas (*E. coli*, *legionella*, presencia de parásitos como nematodos y tenia).**

En relación con el grado de cumplimiento de los sistemas de electrocoagulación respecto a las normativas actuales de reutilización.

#### En relación con la turbidez

Experimentación con placa intermedia

Durante la experimentación, la turbidez del efluente secundario osciló desde 3,5 a 20,5 NTU. El efluente tratado con electrodos de aluminio alcanzó un rendimiento promedio de más de 90%, cuando se trabajó con intensidades de corriente de 3 – 7 A. Con estas intensidades de corriente se alcanzó una reducción en promedio de la turbidez desde 12,2 NTU hasta 1,09 NTU que se considera apta para la reutilización del agua tratada para todos los usos, cuyo límite máximo es de 2 NTU. Para intensidades de 1 A, el rendimiento fue muy bajo, y para 9 A, fue del 88% en promedio.

Cuando se trabajó con electrodos de hierro con placa intermedia, a bajas intensidades (1-3 A) la turbidez se incrementó en más del 200%. El agua de salida era de color naranja oscuro que tardaba mucho tiempo en decantar, pero siempre el clarificado presentaba un color naranja, y se observaban abundantes partículas muy pequeñas en el sobrenadante, que eran responsables del incremento de los SS y la turbidez. A partir de 5 A, el agua de salida era de color verde oscuro y se formaban muy rápidamente los coágulos, es decir, las partículas se agrupaban casi de inmediato y precipitaban dejando un clarificado ligeramente verdoso que con el tiempo se ponía de color naranja. El precipitado permanecía por un tiempo más prolongado con su coloración verdosa y con el tiempo la superficie que estaba en contacto con el agua se tornaba de color marrón naranja y el del fondo era verde oscuro. Se obtuvo un rendimiento en la turbidez del 48 y 45% a intensidades de corriente de 7 y 9 A, correspondientes a 4,5 NTU. Según la normativa de



reutilización de las aguas según sus usos, el agua obtenida con intensidades de corriente a partir de 5 A, se considera apta para todos los usos que menciona la norma excepto para: Usos urbanos: calidad residencial, usos industriales: torres de refrigeración y condensadores evaporativos; usos ambientales: recarga de acuíferos por inyección directa.

Experimentación sin placa intermedia.

Con electrodos de aluminio se consiguió un rendimiento por encima del 80% de eliminación de la turbidez, en todos los casos. Según la normativa de reutilización de las aguas, dependiendo de sus usos, el agua obtenida, con intensidades de corriente a partir de 3 A, alcanzó una reducción importante de la turbidez con valores resultantes por debajo de 2 NTU, siendo apta para la reutilización del agua tratada para usos urbanos calidad 1.1 Residencial: riego de jardines privados y descarga de aparatos sanitarios, cuyo límite es de 2 NTU.

Cuando se trabajó con electrodos de hierro sin placa intermedia, la turbidez se incrementó tanto por el color que mantenía el líquido clarificado como por las partículas muy finas que quedaban en suspensión. El efluente tratado únicamente se considera apto para usos en los cuales no se fijan límites, como son: usos agrícolas calidad 2.2, 2.3, usos industriales calidad 3.1, usos recreativos calidad 4.2, usos ambientales calidad 5.1 y 5.3.

Experimentación con electrodos de aluminio y hierro con placas de grafito como cátodo.

En todos los casos se trabajó sin placa intermedia. La eliminación de la turbidez cuando se trabajó con electrodos de aluminio y grafito, estuvo entre 80 – 92% en todos los rangos de densidades de corriente experimentado, y se alcanzó una reducción en promedio de la turbidez con valor inferior a 1,5 NTU. Según la normativa de reutilización de las aguas, según sus usos, el agua obtenida en esta experimentación se considera apta para la reutilización en todos los usos, excepto para uso industrial calidad 3.2, que fija como límite máximo 1 NTU.

Hierro-grafito, la turbidez se incrementó, salvo cuando se trabajó a 9 A, donde la turbidez se eliminó en un 48%. El agua obtenida sería válida únicamente para distintos usos cuando por la normativa no se fijan límites, ya que muchas veces fue mayor que el agua de entrada.

### En relación con los sólidos suspendidos totales (SST)

#### Experimentación con placa intermedia

Trabajando con electrodos de aluminio con placa intermedia, la eficiencia de eliminación estuvo entre 61 a 75% de eliminación de SST, excepto cuando se trabajó a 1 A y 8 V, en que la cantidad de  $Al^{3+}$  generada (0,0023 g/l de Al), no fue suficiente para coagular, y se observó que en el líquido clarificado quedaban pequeñas partículas que no llegaban a sedimentar, lo cual incrementó el resultado final de los sólidos suspendidos. En cambio, a partir de 3 A con 28 V, y 5 A con 48 V, se alcanzó un rendimiento del 75%. Sin embargo a partir de 7 A el rendimiento ha bajado ligeramente debido, posiblemente, al exceso de aluminio generado (más de 0,0086 gr de Al), y que ha quedado en el clarificado en forma de compuestos solubles formando pequeñas partículas, que no precipitaron. En general, a partir de los 3 A, se obtuvo una reducción en promedio de los SS desde 37,77 mg/l que tenía el agua de entrada hasta 9,77 mg/l que presentó el agua tratada por EC. Lo que le hace válida su reutilización para usos urbanos de calidad 1.1 Residencial: riego de jardines privados y descarga de aparatos sanitarios, cuyo límite es de 10 mg/l de SS.

Trabajando con electrodos de hierro con placa intermedia, la eficiencia de eliminación estuvo entre 48 – 70%, en el rango de intensidades de corriente experimentado. A partir de 3 A con 22 V, se alcanzó un rendimiento por encima del 60%, con un promedio de 16 mg/l de SS del agua de salida a lo largo de la experimentación. El agua obtenida mediante este proceso se considera apta para todos los usos, excepto para los usos que se restringe a un máximo de 10 mg/l de SS.

#### Experimentación sin placa intermedia

Con electrodos de aluminio sin placa intermedia, se alcanzó una eficiencia de eliminación de los SST entre un 60 – 85%, en el rango de intensidades de corriente experimentado. El efluente obtenido se considera apto para todos los usos que menciona la norma, excepto para: Usos urbanos calidad 1.1 residencial, que fija un valor máximo de 10 mg/l en SS. Pero trabajando con 7 y 9 A, sí se ha alcanzado dicho criterio de calidad.

Con electrodos de hierro sin placa intermedia, la eliminación de los SST ha oscilado entre 20-60%. En todos los casos experimentados la concentración estuvo por encima de 20 mg/l, siendo válida para distintos usos (cuando se requiere un máximo de 35 mg/l, según la normativa) como son usos agrícolas calidad 2.2, 2.3, usos industriales calidad 3.1, usos recreativos calidad 4.2, usos ambientales calidad 5.1 y 5.3.

Experimentación con electrodos de aluminio y hierro con placas de grafito

Trabajando con placas de aluminio y grafito, la eficiencia en la eliminación de los SST no fue buena, apenas se han alcanzado un 50%. El agua obtenida, trabajando con electrodos de aluminio, sería apta para los usos cuando se requiere un máximo 20 mg/l, ya que los SS obtenidos han sido de 12 mg/l.

Con placas de hierro y grafito, cuando se trabajó a 10 V y 1,3 A el agua que salía de la celda de electrocoagulación era de color amarillo naranja bastante turbia, no apreciándose flóculos; al cabo de media hora no había ningún precipitado; se dejó decantar otra media hora obteniéndose muy poco precipitado, lo cual incrementó la turbidez y los SS. Cuando se trabajó a 20 con 3 A y 38 V con 5,8 A, el agua que salía de la celda de electrocoagulación era de color amarillo verdoso con abundantes partículas que se iban agrupando según pasaba el tiempo formándose los coágulos que precipitaban. Al cabo de un tiempo el agua del decantador se tornaba de color naranja, es decir que de Fe II pasaba a Fe III por acción del oxígeno del aire, formándose los hidróxidos insolubles y quedando en el agua partículas muy pequeñas que no decantaban y siendo los responsables de la turbidez y el incremento de los SS en el clarificado. En todos los casos experimentados la concentración de los SS estuvo por encima de 20 mg/l, que sería válida para distintos usos (cuando por la normativa se requiere un máximo de 35 mg/l) como son para usos agrícolas calidad 2.2, 2.3, usos industriales calidad 3.1, usos recreativos calidad 4.2, usos ambientales calidad 5.1 y 5.3.

### En relación a la DQO

#### Experimentación con placa intermedia

Se ha podido observar que la eficiencia de eliminación de la DQO trabajando con electrodos de aluminio con placa intermedia ha variado del 56 al 83% a lo largo de la experimentación. En cambio con electrodos de hierro con placa intermedia la eliminación fue ligeramente menor oscilando entre el 37 al 78%.

#### Experimentación sin placa intermedia

Cuando se trabajó con aluminio sin placa intermedia, se consiguió un rendimiento parecido trabajando con placa intermedia del 61 al 80%. Y para el caso del hierro sin placa intermedia la eficiencia de eliminación de la DQO aumentó ligeramente del 51 al 82%, respecto a cuando se trabajó con placa intermedia.

#### Experimentación con placa de grafito

Con electrodos de aluminio- grafito, se alcanzó una eficiencia de eliminación de la DQO de 42 – 66%, y con hierro – grafito una eficiencia de 33 a 60%.

### En cuanto a la eliminación de fósforo total

Se eliminó completamente en todos los casos, es decir que se alcanzó un rendimiento de prácticamente del 100%, salvo en algunos casos cuando la densidad de corriente era muy baja. La eficacia alcanzada en la eliminación de fósforo, se debe a la precipitación con los iones  $Fe^{+3}$  y  $Al^{+3}$  procedentes de los electrodos, formando fosfatos insolubles.

### En relación a la eliminación del nitrógeno total

#### Experimentación con placa intermedia

La reducción del nitrógeno total trabajando con electrodos de aluminio con placa intermedia a intensidades de 3 y 5 amperios han dado mejores resultados de eliminación en torno a 39 – 54% respectivamente. Mientras que, trabajando con electrodos de hierro con placa intermedia se obtuvo un rendimiento del 65% a 3 A y del 49% a 5 A.

#### Experimentación sin placa intermedia

Cuando se trabajó sin placa intermedia en ambos casos la eliminación del nitrógeno total fue más bajo y presentando grandes fluctuaciones en el caso del aluminio.

#### Experimentación con electrodos de aluminio y hierro con electrodos de grafito

Cuando se trabajó con electrodos de aluminio-grafito y con voltajes de 10 V con 1,3 A a 38 V con 5,8 A, se alcanzó una eficiencia de eliminación del 42 al 71% respectivamente. Mientras que con electrodos hierro – grafito a los mismos voltajes e intensidades se obtuvo una eficiencia de eliminación de 33 a 57% respectivamente.

C-20 Con placa intermedia, la eliminación de turbidez con placas de aluminio es superior a la lograda con placas de hierro. Utilizando placas de aluminio, con intensidades entre 2,5 y 4,5 A, el rendimiento es superior al 90%, y entre 4,5 y 9,0 A superior al 85,5.

C-21 Con placa intermedia y con placas de hierro, los mejores rendimientos se obtienen para intensidades entre 6,5 y 9,0 A, con rendimientos entre el 45% y el 48%.

C-22 Sin placa intermedia, la eliminación de turbidez con placas de aluminio es superior a la lograda con placas de hierro. Utilizando placas de aluminio, con intensidades entre 1,0 y 9,0 A, el rendimiento es superior al 80%, alcanzando el máximo rendimiento del 93% para una intensidad de 7,0 A.

C-23 Sin placa intermedia y con placas de hierro, la turbidez se incrementó tanto por el color que mantenía el líquido clarificado como por las partículas muy finas que quedaban en suspensión.

C-24 Con placas de aluminio, según la normativa de reutilización de las aguas, dependiendo de sus usos, el agua obtenida, con intensidades de corriente a partir de 3 A, alcanzó una reducción importante de la turbidez con valores resultantes por debajo de 2 NTU, siendo apta para la reutilización del agua tratada para usos urbanos, calidad 1.1 Residencial: riego de jardines privados y descarga de aparatos sanitarios, cuyo límite es de 2 NTU.

C-25 Sin placa intermedia, la eliminación de turbidez, con placas de aluminio y grafito, es superior al 80%, en el rango de 10 a 60 V, con un valor óptimo del 92% para 40 V.

C-26 Sin placa intermedia y con placas de hierro y grafito, la turbidez solo alcanzó un rendimiento del 50% para 60 V.

C- 27 Sin placa intermedia, la eliminación de turbidez, con placas de aluminio y grafito, voltaje entre 10 y 60 V, se alcanzó valores medios e la turbidez inferiores a NTU. Según la normativa de reutilización de las aguas según sus usos, el agua obtenida en esta experimentación se considera apta para la reutilización en todos los usos, excepto para uso industrial, calidad 3.2, que fija como límite máximo 1 NTU.

C-28 Con placa intermedia, la eliminación de DQO, con placas de aluminio, ha variado del 56 al 83% a lo largo de la experimentación, entre 1 y 9 A, con un óptimo del 83% para una intensidad de 2,5 A.

C-29 Con placa intermedia y con placas de hierro, la turbidez solo alcanzó la eliminación fue, hasta intensidades superiores a los 7 A, ligeramente menor oscilando entre el 37 al 78%. El máximo obtenido para 9 A.

C-30 Sin placa intermedia, la eliminación de DQO, con placas de aluminio, ha variado del 61 al 80% a lo largo de la experimentación, entre 1 y 9 A, con un óptimo del 80% para una intensidad de 7,5 A. Resultados similares a los obtenidos con placas intermedias.

C-31 Sin placa intermedia y con placas de hierro, la turbidez alcanzó una la eliminación del 51 al 82%.El máximo obtenido para 7,5 A. Resultados similares a los obtenidos con placas intermedias.

C-32 Sin placa intermedia, la eliminación de DQO, con ánodo de aluminio y cátodo de grafito, ha variado del 42 – 66%, muy inferior a la reducción con electrodos de aluminio. Los rendimientos mejoran según se elevaba el voltaje de 10 a 60 V.

C-33 Sin placa intermedia y con ánodo de de hierro y cátodo de grafito, la DQO alcanzó una la eliminación del 33 a 60%, muy inferior a la alcanzada con los electrodos de hierro del 51 al 82%.El máximo obtenido para 40 V.

C-34 Sin placa intermedia, la eliminación de sulfatos es prácticamente nulo para menos de 3 minutos de tiempo de retención, y un descenso no significativo hasta los 6 minutos, para voltajes de 3 a 35 V.

C-35 Sin placa intermedia, puede observarse un rendimiento nulo, hasta los 6 minutos de tiempo de retención para voltajes de 3 y 12 V. Para 35 V, se observa un descenso del 50%.

C-36 Sin placa intermedia, en batch, la eliminación de fosfatos es prácticamente nula para 12 V, alcanzando rendimientos de hasta el 50% para diferencia de potencial de 35 V.

C-37 Sin placa intermedia, con caudal circulante, puede observarse un rendimiento del 77% para voltajes de 10 y 15 V, en tiempos de retención cortos, de 2 minutos. Se comprueban estos rendimientos para 31 y 40 V, viéndose que no crecen significativamente los rendimientos al incrementarse la diferencia de potencial.

C-38 En sistema batch, la eliminación de sulfatos, nitratos y fosfatos es prácticamente poco significativa para tiempos de retención inferiores a 2,5 minutos. Por el contrario, con caudal en continuo, con electrodos de hierro, separación 2,2 cm, se han obtenido reducción en los fosfatos entre el 59,3% y el 82,4% con diferencia de potencial entre 22 y 40 V. Con electrodos de aluminio, 2,1 cm de separación, los rendimientos obtenidos han variado de forma creciente, del 92,1% al 97,5%, al aumentar el voltaje de 10 a 40 V. Se aumenta un 5,9% de eliminación de fosfatos, al pasar de 10 a 40 V.

C-64 Con electrodos de aluminio y placas de acero interpuestas, y en relación al fósforo total, se puede decir que la eliminación ha sido prácticamente del 100% en todos los casos. Intensidad de corriente entre 3 y 9 A.

C-65 Con electrodos de aluminio y placas de acero interpuestas, se justifica el sistema como un buen método para la reutilización de aguas, saliendo del secundario de una depuradora. Turbidez inferior a 0,1 NTU.

C-66 Con electrodos de aluminio y placa intermedia sin corriente, y en el caso de la DQO, se obtuvo un rendimiento global por encima del 50%, y por encima del 70% para intensidades entre 2 y 9 A, llegando a una eliminación mayor del 80% a 3 A y 23 V. El rango de pH del agua residual tratada que servía de alimentación a la planta piloto variaba de entre 6,5 a 7,5, motivo por el cual no fue necesario ajustar el pH. El agua tratada salía con un ligero aumento del pH; solamente cuando se trabajó a 9 A y 58 V el pH se incrementó a 8,7.

C-67 Con electrodos de aluminio y placa intermedia sin corriente, en cuanto a los SST, se puede observar que a 1 A y 8 V la cantidad de  $Al^{3+}$  generado (0,0023 g/l de Al) no fue suficiente para coagular y se observó que, en el líquido clarificado, quedaban pequeñas partículas que no llegaban a sedimentar, lo cual incrementó el resultado final de los sólidos suspendidos.

C-68 Con electrodos de aluminio y placa intermedia sin corriente, en cuanto a los SST, a partir de 7 A el rendimiento ha bajado ligeramente, debido, posiblemente, al exceso de aluminio generado (más de 0,0086 gr de Al), quedando en el clarificado pequeños flóculos, formando pequeñas partículas que no precipitaron.

C-69 Con electrodos de aluminio y placa intermedia sin corriente, en general, a partir de los 3 A, se obtuvo una reducción de los SST en promedio de 37,77 mg/l hasta 9,77 mg/l. Lo que le hace válida su reutilización para usos urbanos de calidad 1.1 Residencial: riego de jardines privados y descarga de aparatos sanitarios, cuyo límite es de 10 mg/l de SS.

C-70 Con electrodos de aluminio y placa intermedia sin corriente, en cuanto al nitrógeno total, se alcanzó un ligero rendimiento del 39 % a 3 A y del 54% a 5 A. Por debajo o por encima de esas intensidades de corriente, el rendimiento fue bajo. Posiblemente debido a esas intensidades el



potencial generado en la celda es adecuado para reducir los nitrógenos presentes en el agua a formas de NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, N<sub>2</sub> o NH<sub>3</sub>.

C-71 Con electrodos de aluminio y placa intermedia sin corriente, según la normativa de reutilización de las aguas según sus usos, el agua obtenida con intensidades de corriente a partir de 3 A se considera apta para todos los usos que menciona la norma, excepto para usos industriales: calidad 3.2 torres de refrigeración y condensadores evaporativos, que se requiere 5 mg/l como máximo en SS.

C-72 Con electrodos de hierro y placas de acero interpuestas, y en relación al fósforo total, se puede decir que la eliminación ha sido prácticamente del 100% en todos los casos. Intensidad de corriente entre 3 y 9 A.

C-73 Con electrodos de hierro y placas de acero interpuestas, para la DQO, a partir 3 A, se obtuvieron buenos rendimientos, alrededor del 70%, llegando a una eliminación del 77% a 3 A y 22 V. En el agua tratada, la DQO ha variado desde un máximo de 34 mg/l a un mínimo de 10 mg/l. Mientras que en el agua de entrada ha variado, durante la experimentación, desde un máximo de 141 a un mínimo de 26 mg/l.

C-74 Con electrodos de hierro y placas de acero interpuestas, en cuanto a los SST, se pudo observar que a partir de 3 A con 22 V, se alcanzó un rendimiento por encima del 60%, con un promedio de 16 mg/l de SS, en salida.

C-75 Con electrodos de hierro y placas de acero interpuestas, tiene importancia, igual que en el caso anterior con aluminio, el tiempo de sedimentación, que se recomienda superior a 1 hora.

C-76 Con electrodos de hierro y placas de acero interpuestas, a partir de 7 A. de intensidad de corriente, se alcanzaron rendimientos superiores al 42%, con una turbidez en salida inferior a 4,5 NTU. Según la normativa de reutilización de las aguas, y según sus usos, el agua obtenida con intensidades de corriente a partir de 5 A, se considera apta para todos los usos que menciona la norma excepto para: Usos urbanos: calidad residencial, usos industriales: calidad 3.2 torres de refrigeración y condensadores evaporativos; usos ambientales: calidad 5.2 recarga de acuíferos por inyección directa.

C-77 Con electrodos de hierro y placas de acero interpuestas, en cuanto al nitrógeno total, se alcanzó un rendimiento interesante entre los 2 y 5 A. Rendimientos del del 65 % a 3 A y del 49% a 5 A. Por debajo o por encima de esas intensidades de corriente el rendimiento fue bajo.

C-78 En la comparación de rendimientos entre placas de aluminio y hierro con placas de acero interpuestas, sin corriente, pueden darse las siguientes conclusiones:

1. En relación con la DQO, a intensidades inferiores a 7 A, con electrodos de aluminio se obtienen mayores rendimientos.
2. En relación con los SST, a intensidades inferiores a 9 A, con electrodos de aluminio se obtienen mayores rendimientos.
3. En relación con la turbidez, siempre, con electrodos de aluminio se obtienen mayores rendimientos.
4. En relación con el P, a intensidades superiores a 3 A, con electrodos de aluminio o de hierro se obtienen rendimientos próximos al 100%.
5. En relación con el N, a intensidades inferiores a 5 A, con electrodos de hierro se obtienen mayores rendimientos. De 5 a 10 A, los rendimientos son similares para el aluminio y el hierro.

C-79 Con electrodos de aluminio, y placas de acero interpuestas, en cuanto a la reducción de coliformes totales, se alcanza una importante reducción de los coliformes totales a partir de 5 A. Para el caso de la celda conteniendo electrodos de aluminio se alcanza una eliminación de 3 décadas logarítmicas, lo que equivale a más de un 99,8%. Para el caso de la celda de hierro se alcanzó una reducción de 5 décadas logarítmicas a partir de 7 A, lo que equivale a más de un 99,99% de eliminación.

C-80 Con electrodos de aluminio, y placas de acero interpuestas, en cuanto a la reducción de E. coli, a partir de 5 A, se logra una reducción de 5 décadas logarítmicas.

C-81 Con electrodos de aluminio, y placas de acero interpuestas, según la normativa de reutilización, exigida por el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (BOE nº 294, 08/12/2007), el agua obtenida mediante el proceso de electrocoagulación usando ambos electrodos, a partir de 5 A cumplen los requisitos exigidos por la norma para todos los usos, excepto para: Usos urbanos calidad 1.1: Residencial que fija un valor máximo admisible de E. Coli de 0 UFC/ 100 ml. Usos industriales, calidad 3.2: Torres de refrigeración y condensadores evaporativos, que fija ausencia de UFC/100 ml. Usos ambientales, calidad 5.2: recarga de acuíferos que fija en 0 UFC/100 ml.

C-82 Con electrodos de aluminio, sin placas interpuestas, y en relación al fósforo total, se puede decir que la eliminación ha sido prácticamente del 100% en todos los casos. Intensidad de corriente entre 1 y 9 A.

C-83 Con electrodos de aluminio, sin placas interpuestas, para la DQO, el grado de eliminación de la DQO estuvo por encima del 61% en todos los rangos de intensidades de corriente experimentados.

C-84 Con electrodos de aluminio, sin placas interpuestas, en cuanto a los SST, La eliminación de los SST también fue buena, por encima del 50%.

C-85 Con electrodos de aluminio, sin placas interpuestas, y según la normativa de reutilización de las aguas, dependiendo de sus usos, el agua obtenida, con intensidades de corriente a partir de 1 A, alcanzó una reducción de la turbidez superior al 80%, quedando en valores inferiores a 2 NTU, siendo apta para la reutilización del agua tratada para usos urbanos, calidad 1.1 Residencial: riego de jardines privados y descarga de aparatos sanitarios, cuyo límite es de 2 NTU. En cuanto a los SS se considera apta para todos los usos que menciona la norma, excepto para: Usos urbanos calidad 1.1 residencial, que fija un valor máximo de 10 mg/l en SS. Pero trabajando con 7 y 9 A, sí se ha alcanzado dicho criterio de calidad.

C-86 Con electrodos de aluminio, sin placas interpuestas, en cuanto al nitrógeno total, la eliminación del nitrógeno fue moderada.

C-87 Con electrodos de hierro, sin placas interpuestas, y en relación al fósforo total, puede decirse que el fósforo se eliminó casi totalmente. La eliminación ha sido prácticamente del 100% en todos los casos. Intensidad de corriente entre 1 y 9 A.

C-88 Con electrodos de hierro, sin placas interpuestas, para la DQO, el grado de eliminación de la DQO estuvo por encima del 51% en todos los rangos de intensidades de corriente experimentados. Intensidad de corriente entre 1 y 9 A. Para 7 A, se alcanzó un rendimiento superior al 80%.

C-89 Con electrodos de hierro, sin placas interpuestas, en cuanto a los SST, La eliminación de los SST fue buena, por encima del 50%, para intensidades de 7 a 9 A.

C-90 Con electrodos de hierro, sin placas interpuestas, en cuanto al nitrógeno total, la eliminación del nitrógeno fue escasa.

C-91 En la comparación de rendimientos entre placas de aluminio y hierro sin placas, pueden darse las siguientes conclusiones:

1. En relación con la DQO, a intensidades inferiores a 9 A, con electrodos de aluminio se obtienen mayores rendimientos.
2. En relación con los SST, a intensidades inferiores a 9 A, con electrodos de aluminio se obtienen mayores rendimientos.
3. En relación con la turbidez, siempre, con electrodos de aluminio se obtienen mayores rendimientos. Con electrodos de hierro los rendimientos son muy escasos.
4. En relación con el P, a intensidades superiores a 1 A, con electrodos de aluminio se obtienen rendimientos superiores a los obtenidos con electrodos de hierro.
5. En relación con el N, a intensidades entre 5 y 7 A, con electrodos de hierro se obtienen mayores rendimientos.

C-92 Con electrodos de aluminio, sin placas interpuestas, se alcanzó una ligera reducción de 2 décadas logarítmicas de coliformes totales cuando se trabajó con electrodos de aluminio a partir de 3 A de intensidad de corriente. Para el caso de la celda conteniendo electrodos de hierro se alcanzó una eliminación bastante pobre, tan solo a 9 A se reducen 3 décadas logarítmicas, lo que equivale a un 99,8%.

C-93 Con electrodos de aluminio, sin placas interpuestas, en cuanto a la reducción de E. coli, utilizando electrodos de aluminio y hierro sin placa intermedia entre electrodos. Se puede observar que a partir de 5 A, se logra una reducción de 2 décadas logarítmicas, para el caso de electrodos de aluminio. En cambio para el hierro, a partir de 7 A, se alcanzan mejores reducciones de E. Coli.

C-94 Con electrodos de aluminio, sin placas interpuestas, según la normativa de reutilización, exigida por el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (BOE nº 294, 08/12/2007), el agua obtenida mediante el proceso de electrocoagulación usando electrodos de aluminio, a partir de 5 A, cumplen los requisitos exigidos por la norma para ciertos usos, como son para: Usos agrícolas, calidad 2.3. Usos industriales, calidad 3.1. Usos recreativos, calidad 4.2, que fijan un límite máximo de 10.000 UFC/100 ml. Cuando se trabajó con electrodos de hierro a 7 A, el efluente obtenido sería apto para los usos anteriormente mencionados, y a 9 A el efluente sería apto para otros usos más restrictivos excepto para los casos donde se requiera 0 UFC/100 ml, ya que la reducción a esas intensidades de corriente fue de 38 UFC/100 ml.

C-95 Con electrodos de aluminio y grafito, sin placas interpuestas, y en relación al fósforo total, se puede decir que la eliminación ha sido prácticamente del 100% en todos los casos, excepto a 10 V con 1,3 A. Para el caso de P-total la norma fija un máximo de 2 mg/l, mientras que en el agua obtenida en la presente investigación. Solo trabajando a 10 V y 1 A, el rendimiento fue del 80%, saliendo el agua con una turbidez inferior a 0,1 mg/l.

C-96 Con electrodos de aluminio y cátodo de grafito, sin placas interpuestas, para la DQO, el grado de eliminación de la DQO estuvo entre 42,5 y 66% en los rangos de voltajes experimentados.

C-97 Con electrodos de aluminio con cátodo de grafito, sin placas interpuestas, la eliminación de los SST fue media, entre el 25 y el 59%, con los mejores resultados entre 10 y 30 V.

C-98 Con electrodos de aluminio y cátodo de grafito, sin placas interpuestas, y según la normativa de reutilización de las aguas según sus usos, en el agua obtenida en esta experimentación, se alcanzó una reducción de la turbidez a valores inferiores a 1,5 NTU, que se considera apta para la reutilización del agua tratada para todos los usos, pero por los SS no sería apta para los usos que menciona, con un valor máximo de 10 mg/l en SS, porque los SS obtenidos han sido de 12 mg/l.

C-99 Con electrodos de aluminio y cátodo de grafito, sin placas interpuestas, en cuanto al nitrógeno total, la eliminación del nitrógeno fue moderada, valores de reducción superiores al 40% para diferencia de potencial entre 10 y 50 V.

C-100 Con electrodos de hierro y cátodo de grafito, sin placas interpuestas, y en relación al fósforo total, puede decirse que el fósforo se elimina totalmente, excepto a 10 V con 1,3 A, que se redujo en un 60%.

C-101 Con electrodos de hierro y cátodo de grafito, sin placas interpuestas, El grado de eliminación de la DQO ha variado desde el 33 a 60% con los voltajes experimentados. Valor óptimo a 40 V.

C-102 Con electrodos de hierro y cátodo de grafito, sin placas interpuestas, en cuanto a los SST, La eliminación de los SST fue del 20% al 40%, con voltajes entre 40 y 60 V.

C-103 Con electrodos de hierro, sin placas interpuestas, la eliminación del nitrógeno fue regular entre 25 y 57%. Valor óptimo a 40 V.

C-104 En la comparación de rendimientos entre placas de aluminio y hierro sin placas, pueden darse las siguientes conclusiones:

1. En relación con la DQO, a voltajes de 10 a 60 V, con electrodos de aluminio se obtienen ligeramente mayores rendimientos.

2. En relación con los SST, a voltajes inferiores a 40 V, con electrodos de aluminio se obtienen mayores rendimientos.
3. En relación con la turbidez, siempre, con electrodos de aluminio se obtienen mayores rendimientos. Con electrodos de hierro los rendimientos son muy escasos.

#### En relación a los parámetros microbiológicos

##### Experimentación con electrodos de aluminio y hierro con placa intermedia

##### Coliformes totales.

En la presente investigación se ha alcanzado una importante reducción de los coliformes totales a partir de 5 A. Para el caso de la celda conteniendo electrodos de aluminio se alcanzó una eliminación de 3 décadas logarítmicas, lo que equivale a más de un 99,8%. Para el caso de la celda de hierro se alcanzó una reducción de 5 décadas logarítmicas a partir de 7 A, lo que equivale a más de un 99,99% de eliminación.

##### E. Coli

En relación a la eliminación de E. Coli, tanto con electrodos de aluminio y como de hierro con placa intermedia, a partir de 5 A se alcanzó una reducción de 5 décadas logarítmicas, es decir una eliminación superior al 99,99 %

Según la normativa de reutilización, exigida por el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (BOE nº 294, 08/12/2007), el agua obtenida mediante el proceso de electrocoagulación usando ambos electrodos, a partir de 5 A cumplen los requisitos exigidos por la norma para todos los usos, excepto para aquellos usos que fijan un valor máximo admisible de E. Coli de 0 UFC/ 100 ml.

## Electrodos de aluminio y hierro sin placa intermedia

### Coliformes Totales

Cuando se trabajó con electrodos de aluminio, a partir de 3 A de intensidad de corriente se alcanzó una reducción de 2 décadas logarítmicas de coliformes totales. Para el caso de la celda conteniendo electrodos de hierro se alcanzó una eliminación bastante pobre. Tan solo a 9 A se reducen 3 décadas logarítmicas, lo que equivale a un 99,8%.

### E. Coli

En cuanto, a los rendimientos obtenidos en la eliminación de E. Coli, en la presente investigación, utilizando electrodos de aluminio sin placa intermedia a partir de 5 A, se logró una reducción de 2 décadas logarítmicas. En cambio con electrodos de hierro sin placa intermedia a partir de 7 A, se alcanzan mejores reducciones de E. Coli.

Según la normativa de reutilización antes mencionada, el agua obtenida mediante el proceso de electrocoagulación usando electrodos de aluminio, a partir de 5 A, cumplen los requisitos exigidos por la norma para ciertos usos, como son para: Usos agrícolas, calidad 2.3. Usos industriales, calidad 3.1. Usos recreativos, calidad 4.2, que fijan un límite máximo de 10.000 UFC/100 ml. Cuando se trabajó con electrodos de hierro a 7 A, el efluente obtenido sería apto para los usos anteriormente mencionados, y a 9 A el efluente sería apto para otros usos más restrictivos excepto para los casos donde se requiera 0 UFC/100 ml, ya que la reducción a esas intensidades de corriente fue de 38 UFC/100 ml.

## Experimentación con electrodos de aluminio-grafito y hierro-grafito

### Coliformes totales

Con electrodos aluminio-grafito, se alcanzo una ligera reducción de entre 1 y 2 décadas logarítmicas de coliformes totales. Para el caso de la celda con electrodos de hierro-grafito, se alcanzaron mejores reducciones de entre 2 y 3 décadas logarítmicas, lo que este último equivale a un 98,7%.



## E. Coli

Referente a la eliminación de E. Coli, con electrodos de aluminio-grafito a 38 V con 5,8 A, se alcanzó una reducción de 2 décadas logarítmicas, y a 58 V con 9,5 A se redujo en 3 décadas logarítmicas. En cambio con electrodos de hierro-grafito a partir de 38 V con 5,8 A se alcanzan reducciones de 3 décadas logarítmicas de E. Coli.

Según la normativa de reutilización, anteriormente mencionada. El agua obtenida mediante el proceso de electrocoagulación usando electrodos de aluminio-grafito a 38 V con 5,8 A cumplen los requisitos exigidos por la norma para ciertos usos, como para: Usos agrícolas, calidad 2.3. Usos industriales, calidad 3.1. Usos recreativos, calidad 4.2, que fijan un límite máximo de 10.000 UFC/100 ml, y a 58 V el agua sería apta para los usos mencionados anteriormente y además para Usos agrícolas: calidad 2.2, Usos industriales calidad 3.1c, y usos ambientales calidad 5.1, en los cuales la norma fija unos de límites de 1000 UFC/100 ml. Cuando se trabajó con electrodos de hierro-grafito a 38 V con 5,8 A y 58 V con 9 A, el efluente obtenido sería apto para los usos anteriormente mencionados, ya que la cantidad de E. Coli fue de 700 y 300 UFC/100 ml respectivamente.

Se puede concluir que los microorganismos han sido inactivados electroquímicamente ó mediante la generación de agentes eliminadores como los OH<sup>-</sup> que se generan en las reacciones electroquímicas. Una tercera vía de reducción de la concentración de E. coli y coliformes totales en el clarificado puede ser debido a la electrosorción de las bacterias y su depósito (o fijación) sobre la superficie de los electrodos y por consiguiente su desactivación.

En relación con los nematodos intestinales y legionella pneumophila:

En todos los análisis realizados del agua a la salida del decantador secundario y no se ha detectado legionella es decir 0 UFC/100 ml. Tampoco se han detectado huevos de nematodos (0 huevos/100 ml). Como consecuencia de estos resultados se consideró no analizar el agua de salida del electrocoagulador, y por tanto no ha sido posible extraer conclusiones en relación con éstos parámetros.

C-105 Con electrodos de aluminio y cátodo de grafito, sin placas interpuestas, se alcanza una ligera reducción de entre 1 y 2 décadas logarítmicas de coliformes totales cuando se trabajó con electrodos de aluminio-grafito. Para el caso de la celda conteniendo electrodos de hierro-grafito, se alcanzan mejores rendimientos de eliminación de entre 2 y 3 décadas logarítmicas, lo que este último equivale a de un 98,7%.

C-106 Con electrodos de aluminio y cátodo de grafito, sin placas interpuestas, los rendimientos obtenidos en la eliminación de E. Coli, en la presente investigación, utilizando electrodos de aluminio-grafito y hierro-grafito. Se puede observar que a 38 V con 5,8 A, se alcanza una reducción de 2 décadas logarítmicas, y a 58 V con 9 A se logra 3 décadas logarítmicas para el caso de electrodos de aluminio. En cambio para el hierro a partir de 38 V con 5,8 A se alcanzan reducciones de 3 décadas logarítmicas de E. Coli.

C-107 Con electrodos de aluminio y cátodo de grafito, sin placas interpuestas, según la normativa de reutilización, exigida por el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (BOE nº 294, 08/12/2007), El agua obtenida mediante el proceso de electrocoagulación usando electrodos de aluminio-grafito a 38 V con 5,8 A cumplen los requisitos exigidos por la norma para ciertos usos, como para: Usos agrícolas, calidad 2.3. Usos industriales, calidad 3.1. Usos recreativos, calidad 4.2, que fijan un límite máximo de 10.000 UFC/100 ml, y a 58 V con 9 A el agua sería apta para los usos mencionados anteriormente además para Usos agrícolas: calidad 2.2, Usos industriales calidad 3.1c, y usos ambientales calidad 5.1, en los cuales la norma fija unos de límites de 1000 UFC/100 ml. Cuando se trabajó con electrodos de hierro-grafito a 38 V con 5,8 A y 58 V con 9 A, el efluente obtenido sería apto para los usos anteriormente mencionados, ya que la cantidad de E. Coli fue de 700 y 300 UFC/100 ml respectivamente.

***Verificar el rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación en relación con la modificación de la dureza del agua***

En relación con el rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación con la modificación de la dureza del agua.

La dureza total del agua efluente del decantador secundario durante la experimentación ha variado desde 111 hasta 120 mg/l  $\text{CaCO}_3$  y la dureza cálcica desde 35,8 a 38 mg/l  $\text{Ca}^{2+}$ . Los experimentos se han llevado a cabo sin modificar el pH ni la conductividad. Siempre se trabajó a caudal constante en todos los experimentos realizados.

Los rendimientos alcanzados en la experimentación con electrodos aluminio con placa intermedia, a 7 y 9 A se alcanzó un ligero rendimiento, por encima del 30 %. Mientras que con electrodos de hierro con placa intermedia los rendimientos alcanzados fueron pobres, máximo 19% con la máxima intensidad de corriente (9 A).

Cuando se trabajó con electrodos de Al y Fe sin placa intermedia y combinando los mismos con grafito el rendimiento en la reducción de la dureza fue muy pobre.

Por lo tanto, podemos concluir que la EC no es un tratamiento recomendable para la modificación de la dureza.

C-108 Con electrodos de aluminio y hierro, con placas interpuestas, con electrodos de aluminio a 7 y 9 A se alcanza un ligero rendimiento, por encima del 30 %. Mientras que con electrodos de hierro los rendimientos alcanzados fueron pobres.

C-109 Con electrodos de aluminio y hierro, con placas interpuestas, sin placa intermedia. En estas experiencias se produjo una disminución baja de la dureza total, y de la dureza cálcica, tanto, trabajando con electrodos de aluminio como con electrodos de hierro.

C-110 Con electrodos de aluminio-grafito y hierro-grafito. El rendimiento alcanzado es muy bajo tanto en la dureza total como en la dureza cálcica.

C-111 Con electrodos de aluminio y hierro, modificando la conductividad del agua que alimentaba las celdas electrolíticas. El rendimiento alcanzado es muy bajo tanto en la dureza total como en la dureza cálcica, trabajando a una intensidad de corriente de 9 A.

***Verificar el rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación en relación con la modificación de la conductividad de las aguas efluentes del secundario.***

En relación con el rendimiento obtenido por medio de los sistemas de electrocoagulación con la modificación de la conductividad de las aguas efluentes del secundario.

El objetivo de este hito era determinar en qué medida influye la conductividad del agua en los rendimientos del proceso de EC. Para ello, se ha modificado artificialmente la conductividad del agua y se ha experimentado con las siguientes concentraciones de cloruro de sodio: 75,47 mg/l, 188,68 mg/l, 301,89 mg/l, y 415,09 mg/l, cuyas conductividades resultantes en el agua de alimentación a las celdas fueron: 903, 1135, 1404, 1638  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respectivamente.

En estas experiencias se trabajó sin placa intermedia, manteniendo la misma distancia entre electrodos de las experiencias anteriores.

Experimentación con placas de aluminio

Trabajando con electrodos de aluminio, el porcentaje de eliminación de la DQO ha variado desde 58 % hasta un 78%. Los más altos rendimientos en todos los parámetros fisicoquímicos como: DQO, SS, fósforo, nitrógeno y turbidez se alcanzaron a concentraciones de entre 188 -301 mg/l de NaCl. Además, con el incremento de la conductividad el voltaje disminuyó de 34 a 21 voltios, trabajando a las mismas intensidades de corriente de 9 A. Para ello consumo de energía eléctrica ha bajado desde 1,54 kWh/m<sup>3</sup> con 34 voltios hasta 1,045 kWh/m<sup>3</sup> con 21 voltios.

Comparando con los resultados obtenidos cuando se trabajó a 9 A sin adicionar cloruro de sodio, el rendimiento de eliminación de la DQO, P-total y SS fue similar. Mientras que, si mejora la eliminación del nitrógeno y la turbidez. El consumo energético a 9 A sin adicionar cloruro fue de 3,62 kWh/m<sup>3</sup>, debido que al aumentar la conductividad baja el voltaje.

Los rendimientos obtenidos en la eliminación de coliformes totales y E. Coli, utilizando electrodos de aluminio, con las diferentes concentraciones de NaCl, fueron: a 34 V, 9 A y 75,4 mg/l de NaCl, se alcanzó una reducción de 4 décadas logarítmicas de coliformes totales y de E. Coli. A 30V, 9,8 A

y 188,68 mg/l y 24 V, 9,8 A y 301,89 mg/l, se reducen 3 décadas logarítmicas de coliformes totales y 4 décadas logarítmicas de E. coli. A 21 V y 415,09 mg/l, la reducción fue de menor cuantía.

#### Experimentación con placas de hierro

En el caso de la celda de hierro, el porcentaje de eliminación de la DQO ha sido muy bueno, del 66 % hasta un 79%.

En cuanto a los SST, en todos los casos experimentados estuvo por encima de 15 mg/l, concentración que sería válida para usos cuando se requiere un máximo de 20 mg/l.

Puede decirse que con la concentración de 75,5 mg/ de NaCl en el agua que entra a la celda de electrocoagulación se han obtenido buenos resultados en todos los parámetros investigados excepto en la turbidez, que siempre fue mayor que en el agua de entrada cuyo valor más bajo obtenido fue de 17 NTU.

Incrementando de la conductividad del agua de entrada al proceso de electrocoagulación, el voltaje disminuyó de 35 a 19 voltios, y el consumo de energía eléctrica ha bajado desde 1,74 kWh/m<sup>3</sup> con 35 voltios hasta 0,946 kWh/m<sup>3</sup> con 19 voltios.

Comparando con los resultados obtenidos cuando se trabajó a 9 A sin adicionar cloruro de sodio, el rendimiento de eliminación de la DQO, P-total y SS y nitrógeno fue ligeramente menor que cuando se adicionó cloruro de sodio. En cuanto al consumo energético a 9 A sin adicionar cloruro fue de 3,43 kWh/m<sup>3</sup>, debido que al aumentar la conductividad baja el voltaje.

Los rendimientos obtenidos en la eliminación de coliformes totales y E. Coli utilizando electrodos de hierro con diferentes concentraciones de NaCl, fueron: a 35 V, 9 A y 75,4 mg/l de NaCl, se alcanza una reducción de 4 décadas logarítmicas de coliformes totales y 5 décadas logarítmicas de E. Coli. Mientras que a 26 V, 9,8 A y 188,68 mg/l y 23 V, 9,8 A y 301,89 mg/l se reducen en 3 décadas logarítmicas los coliformes totales y 4 décadas logarítmicas los E. coli. A 19 V, lo reducción es de menor cuantía.

C-112 Al modificar la conductividad, el porcentaje de eliminación de la DQO ha variado desde 58 % hasta un 78%. Mientras que sin modificar la conductividad a esta misma intensidad de corriente

la eliminación de la DQO fue del 70%, y la eliminación del nitrógeno y la turbidez fue ligeramente menor en comparación cuando se modificó la conductividad.

La concentración efectiva de NaCl en el agua que entraba a la celda de electrocoagulación estaba entre 180 -300 mg/l. Con dichas concentraciones se han logrado altos rendimientos en DQO, SS, fósforo, nitrógeno y turbidez. Además con reducción del voltaje, y por tanto en el consumo de energía eléctrica.

C-113 Con electrodos de aluminio, la conductividad del agua procedente del decantador secundario, que sirve de alimento a la planta piloto, al adicionar cloruro de sodio como electrolito. Se observa además que el voltaje disminuyó de 34 a 21 voltios. Y el consumo de energía eléctrica ha bajado desde 1,54 kWh/m<sup>3</sup> con 34 voltios hasta 1,045 kWh/m<sup>3</sup> con 21 voltios.

C-114 Con electrodos de hierro, se observa el incremento de la conductividad del agua procedente del decantador secundario, que sirve de alimento a la planta piloto, al adicionar cloruro de sodio como electrolito. Se observa, además, que el voltaje disminuyó de 35 a 19 voltios. Y el consumo de energía eléctrica ha bajado desde 1,74 kWh/m<sup>3</sup> con 35 voltios hasta 0,946 kWh/m<sup>3</sup> con 19 voltios.

C-115 Con electrodos de hierro, los rendimientos obtenidos en la eliminación de coliformes totales y E. Coli, con diferentes concentraciones de NaCl. Se puede observar que a 34 V, 9 A y 75,4 mg/l de NaCl, se alcanza una reducción de 4 décadas logarítmicas de coliformes totales y de E. Coli. A 30 y 24 V con 9,8 A, se reducen 3 décadas logarítmicas de coliformes totales y de 4 décadas logarítmicas de E. coli. A 21 V, la reducción es de menor cuantía.

C-116 Según la normativa de reutilización, anteriormente mencionada. El agua obtenida mediante el proceso de electrocoagulación usando electrodos de aluminio cumplen los requisitos exigidos por la norma para todos los usos, excepto para los que restringen a 0 UFC/100 ml de E. Coli.

C-117 En la eliminación de coliformes totales y E. Coli en la presente investigación utilizando electrodos de hierro con diferentes concentraciones de NaCl. Se puede observar que a 35 V, 9 A y 75,4 mg/l de NaCl, se alcanza una reducción de 4 décadas logarítmicas de coliformes totales y 5

décadas logarítmicas de E. Coli. A 26 y 23 V con 9,8 A, se reducen 3 décadas logarítmicas de coliformes totales y de 4 décadas logarítmicas de E. coli. A 19 V, la reducción es de menor cuantía.

C-118 Con electrodos de hierro, Según la normativa de reutilización, anteriormente mencionada. El agua obtenida mediante el proceso de electrocoagulación usando electrodos de hierro cumplen los requisitos exigidos por la norma para todos los usos, excepto para los que restringen a 0 UFC/100 ml de E. Coli.

### **Estudio energético del proceso de electrocoagulación**

$$I = \frac{V}{R}$$

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$$\frac{I}{R} = K \frac{A}{l}$$

$$R = \frac{l}{KA}$$

Superficie de placas:  $31,7 * 50 = 0,1585 \text{ m}^2$

Separación de placas:  $3,1 * 10^{-2} \text{ m}$

Voltaje aplicado: 16,5 V

Intensidad circulante: 5,13 A

Cond. Específica:  $577 \mu\text{S}/\text{cm} = 5,77 \text{ S}/\text{m}$

$$P_{ohmica} = \frac{V^2}{R} = \frac{V^2}{\frac{l}{KA}} = \frac{KA}{l} V^2 = 80,3W$$

$$Potencia_{total} = IV = 16,5 * 5,13A = 84,64W$$

$$Potenciaelectrocoagulación = IV - \frac{KA}{l} V^2 = 4,33W$$

Fracción de potencia de electrocoagulación con relación a la potencia consumida:

$$\frac{4,33}{84,6} = 0,05 = 5\%$$

El costo del proceso de electrocoagulación depende, principalmente, del consumo de los electrodos de sacrificio y de la energía eléctrica. El cual económicamente presenta ventajas frente a otros procesos para conseguir el mismo fin.

La energía consumida para eliminar 1 kg de DQO mediante el proceso de electrocoagulación, puede observarse en los gráficos, en el anejo 2. La diferencia de consumo energético entre electrodos de aluminio y hierro ya sea con placa intermedia o sin ella, fue mínima, es decir que con electrodos de hierro el consumo fue ligeramente menor.

Pero, cabe destacar que con electrodos de hierro la turbidez fue tan alta que restringe el uso del agua obtenida para muchos usos que permite la norma de reutilización, mientras que con electrodos de aluminio se consiguieron altos rendimientos en turbidez y SS.

Cuando se incrementó la onductividad, con electrodos de aluminio a concentraciones de entre 188 y 301 mg/l de NaCl, el consumo energético específico para eliminar 1 kg de DQO fue inferior.

C-119 El costo del proceso de electrocoagulación depende, principalmente, del consumo de los electrodos de sacrificio y de la energía eléctrica. El cual económicamente presenta ventajas frente a otros procesos para conseguir el mismo fin.

La energía consumida para eliminar 1 kg de DQO, mediante el proceso de electrocoagulación, para los electrodos de aluminio y hierro es prácticamente la misma. La diferencia de consumo energético entre ambos electrodos es mínima, ya sea con placa intermedia o sin placa intermedia.



C-120 El consumo de energía sobre la DQO eliminada en función de la intensidad, con electrodos de hierro-grafito y aluminio-grafito, queda reflejado en el gráfico siguiente.

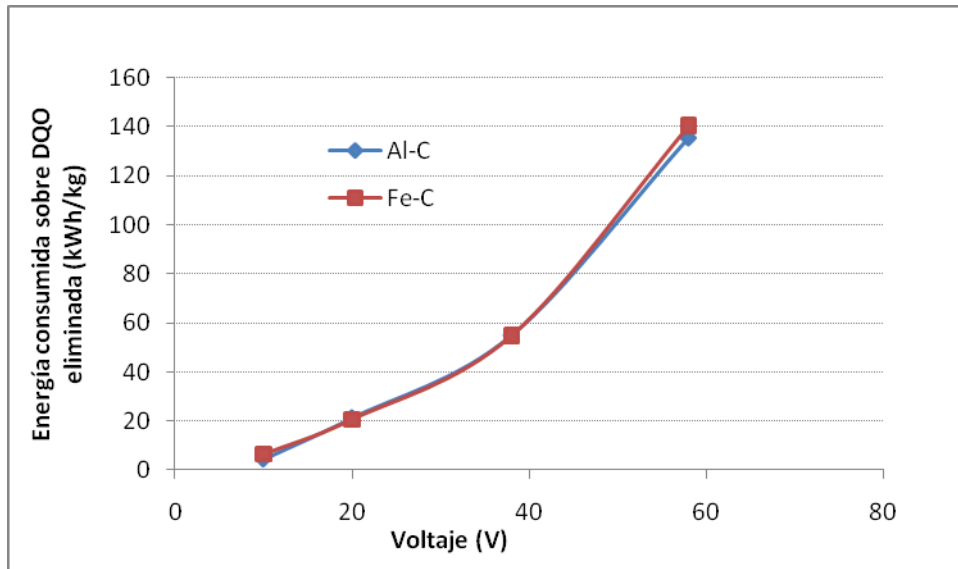


Figura 8.5. Consumo de energía sobre la DQO eliminada en función de la intensidad, con electrodos de hierro-grafito y aluminio-grafito.

C-121 Se observa que el consumo energético, adicionando un electrolito, disminuye considerablemente. También se ve que, con electrodos de aluminio y a concentraciones de entre 250 y 350 mg/l de NaCl, el consumo energético es menor para eliminar 1 kg de DQO mediante el proceso de electrocoagulación.

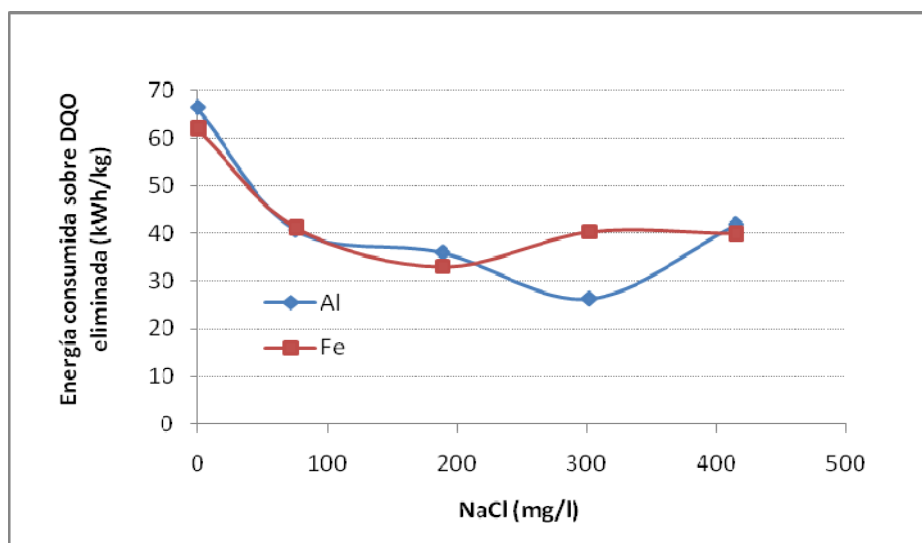


Figura 8.6. Consumo de energía sobre la DQO eliminada en función de la concentración de NaCl (mg/l), trabajando a una intensidad de corriente de 9 A.

## **8.2. Resumen de conclusiones**

### **8.2.1. En relación con la generación de aluminio**

Con electrodos de aluminio, y placa intermedia sin corriente, se puede observar que a 1 A y 8 V la cantidad de aluminio generado no fue suficiente para coagular y se observó que, en el líquido clarificado, quedaban pequeñas partículas que no llegaban a sedimentar, lo cual incrementó el resultado final de los sólidos suspendidos.

### **8.2.2. En relación con la temperatura**

En experiencias, a nivel laboratorio, se observó que la temperatura se incrementaba al aumentar el voltaje. Reducir la separación entre placas y aumentar el tiempo de retención, aumenta la eficiencia de eliminación de los contaminantes.

A nivel de planta piloto, como ya se ha señalado, se observó que la temperatura se incrementaba cuando se aumentaba el voltaje. El incremento en toda la experimentación, en planta semiindustrial, no fue muy acusado, lo máximo que aumentó fue en 3 grados, con la máxima intensidad de corriente (9 Amperios). Es decir a escala real la influencia del incremento de la temperatura no tiene influencia significativa.

### **8.2.3. En relación con el pH**

Para ensayos con agua del laboratorio al incrementar el voltaje y la intensidad se produce un incremento significativo del pH

Con electrodos de aluminio, y placa intermedia sin corriente, el pH juega un papel importante en el desarrollo de la EC. El pH óptimo está entre 5 – 9. En la presente investigación se ha podido observar que el pH del efluente, después del tratamiento por EC, se ha incrementado ligeramente en todos los casos. Cuando se trabajó con soluciones ácidas, a nivel laboratorio, se observó una variación del pH más elevado. En cuanto a las muestras alcalinas, como eran las aguas del río Tajo, que tenía un pH inicial de 8 y después del tratamiento por EC, disminuyó a pH 7,4.

También se observó en planta piloto que cuando se trabajaba a intensidades de corriente de entre 7 y 9 A, el incremento del pH fue mayor que cuando se trabajó con menores intensidades de corriente.

#### **8.2.4. En relación con la DQO**

En relación a la experimentación con placa intermedia se ha podido observar que la eficiencia en la eliminación de la DQO, trabajando con electrodos de aluminio y con placa intermedia, ha variado entre el 56 y el 83% a lo largo de la experimentación. En cambio con electrodos de hierro con placa intermedia la eliminación fue ligeramente menor oscilando entre el 37 al 78%.

En relación a la experimentación sin placa intermedia, trabajando con electrodos de aluminio, se consiguió un rendimiento parecido al obtenido con placa intermedia del 61 al 80%. Y para el caso del hierro, sin placa intermedia, la eficiencia de eliminación de la DQO aumentó ligeramente del 51 al 82%, respecto al obtenido con placa intermedia.

En relación a la experimentación con hierro o aluminio y cátodo de grafito, se alcanzó una eficiencia de eliminación de la DQO de 42 – 66%, y con hierro – grafito una eficiencia de 33 a 60%.

En resumen con electrodos de aluminio se obtienen mayores rendimientos, no siendo significativo el efecto con introducción de placas intermedias sin corriente. La separación entre placas, dentro del rango ensayado, no influye en el rendimiento de la eliminación de DQO.

#### **8.2.5. En relación con los sólidos en suspensión totales (SST)**

Trabajando con electrodos de aluminio, con placa intermedia, la eficiencia de eliminación estuvo entre 61 a 75% de eliminación de SST.

Trabajando con electrodos de hierro, con placa intermedia, la eficiencia de eliminación estuvo entre 48 – 70%.

Con electrodos de aluminio, sin placa intermedia, se alcanzó una eficiencia de eliminación de los SST entre un 60 – 85%.

Con electrodos de hierro sin placa intermedia, la eliminación de los SST ha oscilado entre 20-60%.

Trabajando con placas de aluminio y grafito, la eficiencia en la eliminación de los SST no fue buena, apenas se han alcanzado un 50%.

Con electrodos de hierro y cátodo de grafito, sin placas interpuestas, en cuanto a los SST. La eliminación de los SST fue del 20% al 40%, con voltajes entre 40 y 60 V.

En la comparación de rendimientos entre placas de aluminio y hierro, con placas de acero interpuestas sin corriente, en relación con los SST, a intensidades inferiores a 9 A, con electrodos de aluminio se obtienen mayores rendimientos.

Con electrodos de aluminio, y placa intermedia sin corriente, según la normativa de reutilización de las aguas según sus usos, el agua obtenida con intensidades de corriente a partir de 3 A se considera apta para todos los usos que menciona la norma, excepto para usos industriales: calidad 3.2 torres de refrigeración y condensadores evaporativos, para los que se requiere 5 mg/l como máximo en SS.

En resumen, con la eliminación de SST, los rendimientos más altos se obtienen con electrodos de aluminio, sin placa intermedia. Sólo parece aconsejable ésta con electrodos de hierro.

La concentración efectiva de NaCl en el agua que entraba a la celda de electrocoagulación estaba entre 180 -300 mg/l. Con dichas concentraciones se han logrado altos rendimientos. Con reducción del voltaje, y por tanto en el consumo de energía eléctrica.

### **8.2.6. En relación con la turbidez**

En la experimentación con placa intermedia, el efluente tratado con electrodos de aluminio alcanzó un rendimiento promedio de más de 90%, mientras que con placas de hierro se obtienen rendimientos entre el 45% y el 48%.

Con electrodos de hierro y placas de acero interpuestas, a partir de 7 A. de intensidad de corriente, se alcanzaron rendimientos superiores al 42%, con una turbidez en salida inferior a 4,5 NTU. Según la normativa de reutilización de las aguas, y según sus usos, el agua obtenida con intensidades de corriente a partir de 5 A, se considera apta para todos los usos que menciona la norma excepto para: Usos urbanos: calidad residencial, usos industriales: calidad 3.2 torres de refrigeración y condensadores evaporativos; usos ambientales: calidad 5.2 recarga de acuíferos por inyección directa.

En la experimentación sin placa intermedia y con electrodos de aluminio se consiguió un rendimiento por encima del 80% de eliminación de la turbidez, en todos los casos. Según la normativa de reutilización de las aguas, dependiendo de sus usos, el agua obtenida, con intensidades de corriente a partir de 3 A, alcanzó una reducción importante de la turbidez con valores resultantes por debajo de 2 NTU, siendo apta para la reutilización del agua tratada para usos urbanos calidad 1.1 Residencial: riego de jardines privados y descarga de aparatos sanitarios, cuyo límite es de 2 NTU.

En la experimentación sin placa intermedia y con electrodos de hierro la turbidez alcanzó una la eliminación del 51 al 82%.El máximo obtenido para 7,5 A. Resultados similares a los obtenidos con placas intermedias.

En la experimentación con electrodos de aluminio y hierro, con placas de grafito como cátodo, y trabajando en todos los casos sin placa intermedia, la eliminación de la turbidez cuando se trabajó con electrodos de aluminio y grafito, estuvo entre 80 – 92% en todos los rangos de densidades de corriente experimentado, y se alcanzó una reducción en promedio de la turbidez con valor inferior a 1,5 NTU. Con placas de hierro y grafito, la turbidez solo alcanzó un rendimiento del 50%. Según la normativa de reutilización de las aguas, según sus usos, el agua obtenida en esta experimentación se considera apta para la reutilización en todos los usos, excepto para uso industrial calidad 3.2, que fija como límite máximo 1 NTU.

En la comparación de rendimientos entre placas de aluminio y hierro, con placas de acero interpuestas, se deduce que, con electrodos de aluminio, se obtienen mayores rendimientos.

En la comparación de rendimientos entre placas de aluminio y hierro sin placas de acero interpuestas, siempre, con electrodos de aluminio se obtienen mayores rendimientos. Con electrodos de hierro los rendimientos son reducidos.

Se consiguen rendimientos bajos con aguas de salida del decantador primario, con electrodos de aluminio, con separación de 1,4 cm, diferencia de potencial 16 v, los flóculos son poco consistentes, obteniendo unos rendimientos altos, con valor próximo a cero de turbidez. Con electrodos de hierro, con separación de 2,2 cm, diferencia de potencial 30 V, los flóculos son poco consistentes, obteniendo unos rendimientos del 74% en turbidez.

Con aguas de salida de secundario, con tiempo de retención en la cámara de electrocoagulación, electrodos de aluminio con separación de 1,4 cm, se obtienen buenos resultados con una diferencia de potencial de 10 V, (95% en turbidez). Al realizar los mismos ensayos con diferencia de potencial de 15 V, los rendimientos son prácticamente los mismos,

Con aguas prepotables (SS entre 12 y 20 ppm, Turbidez entre 8,98 y 14,4 NTU, y DQO entre 19 y 31 ppm), con electrodos de aluminio, con diferencia de potencial entre 15 y 150 V, y separación de placas entre 1,4 y 4,7 cm, se ha observado, en relación con la turbidez, que no se dan variaciones significativas en relación con la separación de placas o diferencia de potencial. La variación de rendimientos puede fijarse entre el 92,5% y el 98,1%.

La concentración efectiva de NaCl en el agua que entraba a la celda de electrocoagulación estaba entre 180 -300 mg/l. Con dichas concentraciones se han logrado altos rendimientos en DQO, SS, fósforo, nitrógeno y turbidez, con reducción del voltaje, y por tanto con reducción en el consumo de energía eléctrica.

### **8.2.7. En relación con el fósforo, nitrógeno y sulfatos**

#### En cuanto a la eliminación de fósforo total

Se eliminó completamente en todos los casos, es decir que se alcanzó un rendimiento de prácticamente del 100%. La eficacia alcanzada en la eliminación de fósforo, se debe a la

precipitación con los iones  $Fe^{+3}$  y  $Al^{+3}$  procedentes de los electrodos, formando fosfatos insolubles.

#### En relación a la eliminación del nitrógeno total

En la experimentación, con placa intermedia, la reducción del nitrógeno total trabajando con electrodos de aluminio a intensidades de 3 y 5 amperios, se han obtenido los mejores resultados de eliminación en torno a 39 – 54% respectivamente. Mientras que, trabajando con electrodos de hierro, con placa intermedia, se obtuvieron rendimientos del 65% a 3 A y del 49% a 5 A.

Cuando se trabajó sin placa intermedia, en ambos casos la eliminación del nitrógeno total fue más bajo y presentando grandes fluctuaciones en el caso del aluminio.

Cuando se trabajó con electrodos de aluminio-grafito y con voltajes de 10 V con 1,3 A a 38 V con 5,8 A, se alcanzaron rendimientos de eliminación del 42 al 71% respectivamente. Mientras que con electrodos hierro – grafito, a los mismos voltajes e intensidades, se obtuvieron rendimientos de eliminación del 33 al 57% respectivamente.

#### En cuanto a la eliminación de sulfatos

Trabajando sin placa intermedia, con sistema batch, discontinuo, la eliminación de sulfatos es prácticamente nula para menos de 3 minutos de tiempo de retención, y un descenso no significativo hasta los 6 minutos, para voltajes de 3 a 35 V. Para 35 V, se observa un descenso del 50%.

Trabajando sin placa intermedia, con caudal circulante, puede observarse un rendimiento del 77% para voltajes de 10 y 15 V, en tiempos de retención cortos, de 2 minutos. Se comprueban estos rendimientos para 31 y 40 V, viéndose que no crecen significativamente los rendimientos al incrementarse la diferencia de potencial.

Obsérvese la diferencia de resultados entre los sistemas discontinuos y continuos en el flujo del agua.

### En cuanto a la eliminación de fósforo total, nitrógeno total y sulfatos

En sistema batch, la eliminación de sulfatos, nitratos y fosfatos es prácticamente poco significativa para tiempos de retención inferiores a 2,5 minutos. Por el contrario, con caudal en continuo, con electrodos de hierro, separación 2,2 cm, se han obtenido reducción en los fosfatos entre el 59,3% y el 82,4% con diferencia de potencial entre 22 y 40 V. Con electrodos de aluminio, 2,1 cm de separación, los rendimientos obtenidos han variado de forma creciente, del 92,1% al 97,5%, al aumentar el voltaje de 10 a 40 v. Se aumenta en un 5,9% de eliminación de fosfatos, al pasar de 10 a 40 V.

La concentración efectiva de NaCl en el agua que entraba a la celda de electrocoagulación estaba entre 180 -300 mg/l. Con dichas concentraciones se han logrado altos rendimientos en DQO, SS, fósforo, nitrógeno y turbidez, con reducción del voltaje, y por tanto en el consumo de energía eléctrica.

Se desprende la importancia de la conductividad de lñas aguas en el rendimiento de la planta para eliminación de estos contaminantes.

### **8.2.8. En relación con el E. Coli y coliformes totales**

#### Coliformes totales.

En la presente investigación se ha alcanzado una importante reducción de los coliformes totales a partir de 5 A, para electrodos de aluminio y hierro con placa intermedia.

Para el caso de la celda conteniendo electrodos de aluminio y con placa intermedia se alcanzó una eliminación de 3 décadas logarítmicas, lo que equivale a más de un 99,8%. Para el caso de la celda de hierro con placa intermedia se alcanzó una reducción de 5 décadas logarítmicas a partir de 7 A, lo que equivale a más de un 99,99% de eliminación.

Con electrodos de aluminio y cátodo de grafito, sin placas interpuestas, se alcanza una ligera reducción de entre 1 y 2 décadas logarítmicas de *coliformes totales*. Para el caso de la celda



conteniendo electrodos de hierro-grafito, se alcanzan mejores rendimientos de eliminación de entre 2 y 3 décadas logarítmicas, equivalente a un 98,7%.

### E. Coli

En relación a la eliminación de E. Coli, tanto con electrodos de aluminio y de hierro, con placa intermedia, a partir de 5 A se alcanzó una reducción de 5 décadas logarítmicas, es decir una eliminación superior al 99,99 %.

Sin placas interpuestas, en cuanto a la reducción de E. coli, utilizando electrodos de aluminio y hierro, se puede observar que, a partir de 5 A, se logra una reducción de 2 décadas logarítmicas, para el caso de electrodos de aluminio. En cambio para el hierro, a partir de 7 A, se alcanzan mejores reducciones de E. Coli.

Con electrodos de aluminio y hierro, y cátodo de grafito, sin placas interpuestas, los rendimientos obtenidos en la eliminación de E. Coli, en la presente investigación, a 38 V con 5,8 A, se alcanza una reducción de 2 décadas logarítmicas, y a 58 V con 9 A se logra 3 décadas logarítmicas para el caso de electrodos de aluminio. En cambio para el hierro a partir de 38 V con 5,8 A se alcanzan reducciones de 3 décadas logarítmicas de E. Coli.

Según la normativa de reutilización, Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (BOE nº 294, 08/12/2007), el agua obtenida mediante el proceso de electrocoagulación usando electrodos de aluminio cumplen los requisitos exigidos por la norma para todos los usos, excepto para los que restringen a 0 UFC/100 ml de E. Coli.

En la eliminación de coliformes totales y E. Coli en la presente investigación utilizando electrodos de hierro con diferentes concentraciones de NaCl, se puede observar que a 35 V, 9 A y 75,4 mg/l de NaCl, se alcanza una reducción de 4 décadas logarítmicas de coliformes totales y 5 décadas logarítmicas de E. Coli. A 26 y 23 V con 9,8 A, se reducen 3 décadas logarítmicas de coliformes totales y de 4 décadas logarítmicas de E. coli. A 19 V, la reducción es de menor cuantía.

### **8.2.9. En relación con los metales pesados**

La eliminación de metales (cobre, níquel, cromo y zinc), con diferencia de potencial de 10 V, es más eficaz con placas de aluminio como electrodos, y sin placa intermedia, considerándose óptima la separación de 2,1 cm.

### **8.2.10. En relación con la dureza total y la dureza cálcica**

En todos los ensayos se produjo una disminución de la dureza total y dureza cálcica, tanto con electrodos de aluminio como de hierro. En sistema batch los rendimientos son mínimos, mientras que, con caudal circulante, la reducción de la dureza total ha sido aproximadamente del 55 %, utilizando electrodos de aluminio, variando el voltaje, a 10 V y 12 V.

Con electrodos de aluminio-grafito y hierro-grafito. El rendimiento alcanzado es muy bajo tanto en la dureza total como en la dureza cálcica.

Por lo tanto, podemos concluir que la EC no es un tratamiento recomendable para la modificación de la dureza.

### **8.2.11. En relación con la conductividad eléctrica**

Al incrementar el voltaje, para cada separación de placas, la conductividad se reduce de forma leve.

La conductividad eléctrica, como medida del contenido de iones, durante la electrocoagulación en planta piloto, utilizando placas intermedias, disminuyó ligeramente en todas las experiencias. Mientras que sin placa intermedia a altas intensidades de corriente de 7 y 9 A, aumentó ligeramente, tanto con electrodos de aluminio como de hierro. Con las demás intensidades disminuyó ligeramente

### **8.2.12. En relación con la densidad de corriente**

La densidad de corriente aumenta, al aumentar el voltaje, y al disminuir la separación entre placas.

### **8.2.13. Estudio energético del proceso de electrocoagulación.**

La fracción de potencia de electrocoagulación con relación a la potencia consumida es del orden del 5%

El costo del proceso de electrocoagulación depende, principalmente, del consumo de los electrodos de sacrificio y de la energía eléctrica. El cual económicamente presenta ventajas frente a otros procesos para conseguir el mismo fin.

La energía consumida para eliminar 1 kg de DQO mediante el proceso de electrocoagulación, puede observarse en los gráficos, en el anejo 2. La diferencia de consumo energético entre electrodos de aluminio y hierro ya sea con placa intermedia o sin ella, fue mínima, es decir que con electrodos de hierro el consumo fue ligeramente menor.

Cuando se incrementó la conductividad, con electrodos de aluminio a concentraciones de entre 188 y 301 mg/l de NaCl, el consumo energético específico para eliminar 1 kg de DQO fue inferior.

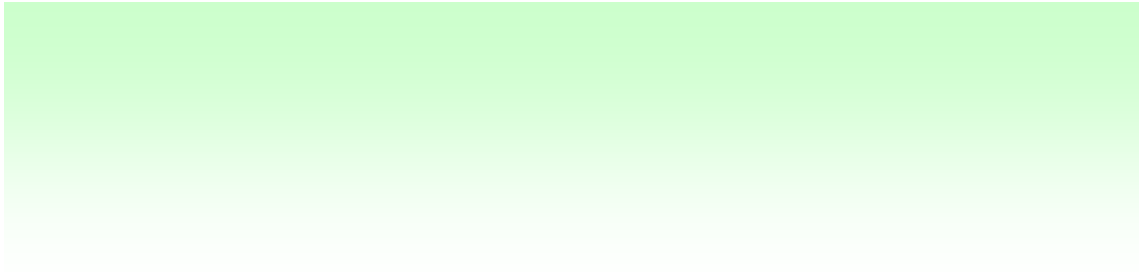
En definitiva concluyo que la electrocoagulación es un proceso a contemplar en los tratamientos terciarios para reutilización de las aguas.

Presenta un gran interés en su aplicación a la salida de plantas existentes, después del proceso biológico secundario.

Es un proceso que optimiza el agua de forma previa a la potabilización de agua de mar o salobre, antes del proceso de membranas.

La utilización de este sistema presenta unas posibilidades amplias en la mejora de la calidad de las aguas. Su aplicación práctica es indudable.

## **CAP. 9. OTRAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN**





## **9. OTRAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN**

Las nuevas líneas de investigación, que se proponen como interesantes, pueden concretarse en:

- Seguir experimentando con diferentes configuraciones con placas intermedias y ajustar la conductividad del agua de entrada a la celda, buscando el punto óptimo que, garantizando una adecuada eliminación de contaminantes y microorganismos, suponga el mínimo consumo energético.
- La reducción del nitrógeno total ha sido regular con electrodos de aluminio con placa intermedia. Es interesante seguir investigando con el fin de entender la termodinámica de la reducción del nitrato aplicando el proceso de electrocoagulación. Esta cuestión podría tener también una aplicación en el tratamiento de aguas subterráneas en pequeñas comunidades agrícolas que tienen el problema de contaminación del agua subterránea por nitratos.
- Seguir investigando en la reducción de la dureza del agua con placas intermedias, con otros tipos de electrodos.





## **ANEJO 1. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA**



# INDICE



---

# INDICE

1. BIBLIOGRAFÍA	1
2. INVESTIGACIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN RECIBIDA	7
2.1. En relación con el primer objetivo “Conocimiento fisicoquímico de la electrocoagulación”	7
2.2. En relación con el segundo objetivo “Influencia sobre la electrocoagulación de parámetros físicos, como pH, conductividad y otros”	22
2.3. En relación con el tercer objetivo, “Eficacia de la electrocoagulación en la eliminación de turbidez”	27
2.4. En relación con el cuarto objetivo. “Eficacia de la electrocoagulación en la eliminación la DQO y absorción UV”	31
2.5. En relación con el quinto objetivo. “Eficacia de la electrocoagulación en la reducción de aniones (nitratos y sulfatos)”	45
2.6. En relación con el sexto objetivo. “Eficacia de la electrocoagulación en la eliminación de cationes”	52
2.7. En relación con el séptimo objetivo. “Efectos de la electrocoagulación sobre las aguas prepotables”	65
2.8. En relación con el octavo objetivo. “Efectos de la electrocoagulación sobre aguas residuales depuradas”	73
2.9. En relación con el noveno objetivo. “Rendimiento de diferentes equipos de electrocoagulación, planos y tubulares”	86
2.10. En relación con el décimo objetivo. “Modelización del proceso”	90
2.11. En relación con el décimo primer objetivo. “Diseño de plantas optimizadas experimentales de electrocoagulación”	115
2.12. En relación con el décimo segundo objetivo. “Estudio energético del proceso”	117



# ANEJO 1. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA

## 1. BIBLIOGRAFÍA

1. Pouet M. F., Grasmick A. (1995), "Urban wastewater treatment by electrocoagulation and flotation", *Water Science Technology* Vol. 31, Nº 3 – 4, pp 275-283.
2. Chen G., Chen X., Yue P. L., (2000), "Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 126, Nº 9, pp 858-863.
3. Hutnan M., Drtil M., Kalina A., (2006), "Anaerobic stabilization of sludge produced during municipal wastewater treatment by electrocoagulation", *Journal of Hazardous Materials*, B131, pp 163 – 169.
4. Parga J. R., Cocke D. L., Valenzuela J. L., Gomes J. A., Kesmez M. Irwin J., Moreno H., Weir M., (2005). *Arsenic removal via electrocoagulation from heavy metal contaminated groundwater in La Comarca Lagunera México*. *Journal of Hazardous Materials*, (artículo en prensa)
5. Lai Chen L., et al., (2003), "Treatment of chemical mechanical polishing wastewater by electrocoagulation: system performances and sludge settling characteristics", *Chemosphere*, (artículo en prensa).
6. Zappi G. D., Weinberg N. L., (2001), "Electrolytic apparatus and method for purification of aqueous solutions", *United State Patent*. Patent No.: 6,315,886.
7. Kimbrough D., Buffet I. H., (2002), *Electrochemical removal of bromide and reduction of THM formation potential in drinking water. Water Research (36): 4902 – 4906*.
8. Den Walter, Chihpin Huang, (2006), "Electrocoagulation of Silica Nanoparticles in Wafer Polishing Wastewater by a Multichannel Flow Reactor: A Kinetic Study", *Journal of Environmental Engineering* © ACSE 132 (12), pp 1651-1658
9. Hansen H. K, Nuñez P., Raboy D., Schippacasse I., Grandon R., (2007), "Electrocoagulation in wastewater containing arsenic: Comparing different process designs", *Electrochimica Acta* 52, pp 3464- 3470.
10. Yousuf M., Mollah A., et al., (2001), *Journal Hazard. Materials* B 84 29.

11. Moreno-Casillas H., Cocke D., Gómez J., Morkovsky P., Parga J., Peterson E. (2007), "Electrocoagulation mechanism for CDO removal". Separation and Purification Technology 56, pp 204 – 211
12. Canizares P., Carmona M., Martínez F., Rodrigo M. A., (2005), "Electrodissolution of Al electrodes in electrocoagulation process", Ind. Eng. Chem. Res. 44, 4178–4185.
13. Pichard T., Cathlifaud G., Mazet M., Vandesteendam C., (2000), "Cathodic dissolution in the electrocoagulation process using Al electrodes, J. Environ. Monit. 2, 77–80.
14. Han M., Lawler D. F. (1992), "The relative insignificance of G in flocculation". J. Am. Water Works Assoc., 84 (10), 79-91.
15. Lescuras-Darroux V., Lapicque F., Valentin G. (2002), "Electrochemical ferrate generation of waste water treatment using cast irons with high silica contents". J. Appl. Electrochemical 32 (1), 57-63.
16. Khemis M., Leclerc J-P., Tanguy G., Valentin G., Lapicque F., (2006), "Treatment of industrial liquid wastes by electrocoagulation: Experimental investigations and an overall interpretation model", Chemical Engineering Science 61, 3602-3609.
17. Cañizares P., Martínez F., Rodrigo M., Jiménez C., Sáez C., Lobato J., (2007), "Modelling of wastewater electrocoagulation processes. Part I. General description and application to kaolin-polluted wastewaters". Separation and Purification Technology. Documento aceptado 4/08/2007.
18. Cañizares P., Martínez F., Rodrigo M., Jiménez C., Sáez C., Lobato J., (2007), "Modelling of wastewater electrocoagulation processes. Part II. Application to dye-polluted wastewaters and oil in water emulsions". Separation and Purification Technology. Documento aceptado 4/08/2007.
19. Duan J., Gregory J., (2003), "Coagulation by hydrolysing metal salts", Adv. Colloid Interface Sci. 100-102, 475-502.
20. Cañizares P., Martínez F., Jiménez C., Lobato J., Rodrigo M. A., (2006), "Coagulation and Electrocoagulation of Wastes Polluted with Dyes", Environ. Sci. Technol. 40, 6418-6424.
21. Monteagudo, J.M., Durán, A., Carmona, M., Schwab, R., Higuera, P., (2003). "Elimination of inorganic mercury from waste waters using crandallitetype compounds". Journal of Chemical Technology and Biotechnology 78, 1–7.
22. Fernández, A., Díaz, M., Rodríguez, A., (1995). "Kinetic mechanisms in ion exchange processes". The Chemical Engineering Journal 57, 17–25.



23. De Lucas, A., Cañizares, P., García, M., Gómez, J., Rodríguez, J.F., (1998). "Recovery of nicotine from aqueous extracts of tobacco wastes by an H<sup>+</sup>-form strong acid-ion exchanger". *Industrial and Engineering Chemistry Research* 37, 4783–4791.
24. Bilba, D., Bilba, N., Albu, M., (1999). "Kinetics of cadmium ion sorption on ion exchange and chelating resins". *Solvent Extraction and Ion Exchange* 17, 1557–1569.
25. Carmona M., Khemis M., Leclerc J-P., Lapicque F., (2006) "A simple model to predict the removal of oil suspensions from water using the electrocoagulation technique". *Chemical Engineering Science* 61, 1237-1246-
26. Hu C. Y., Lo S. L., Kuan W. H., (2007). "Simulation the kinetics of fluoride removal by electrocoagulation (EC) process using aluminum electrodes". *Journal of Hazardous Materials* 145, 180-185
27. Mameri N., Yeddou A. R., Lounici H., Belhocine D., Grib H., Bariou B. (1998), "Defluoridation of septentrional Sahara water of north Africa by electrocoagulation process using bipolar aluminium electrodes, *Water Research* 32, 1604–1612.
28. Emamjomeh M. M., Sivakumar M., Schafer A. I., (2006). "An empirical model for defluoridation by batch monopolar electrocoagulation/flotation (ECF) process", *Journal of Hazardous Material* 131, 118–125.
29. Nian C. Y., Yang W. H., Tarnng Y. S. J., (1999). "Optimization of turning operations with multiple performance characteristics". *Mater. Process. Technol.* 95, 90.
30. Irdemez S., Yildiz Y. S., Tosunoglu V., (2006), "Optimization of phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with aluminum plate electrodes". *Separation and Purification Technology* 52, 394-401.
31. Hansen H. K., Núñez P., Grandon R., (2006). "Electrocoagulation as a remediation tool for wastewaters containing arsenic". *Minerals Engineering* 19, 521-524.
32. Tezcan Ü., Ugur S., Koparal A. S., Bakir Ogutveren U., (2006). "Electrocoagulation of olive mill wastewater". *Separation and Purification Technology* 56, 136-141.
33. Mollah M. Y., Schennach R., Parga J., Cocke D., (2001), "Electrocoagulation (EC)-science and applications". *Journal of Hazardous Materials* B84, 29 – 41.
34. Zoski Cynthia G. (2007), "Handbook of electrochemistry". 1<sup>ª</sup> Edition, Elsevier.
35. Paul A. B., (1996), "Proceedings of the 22nd WEDC Conference on Water Quality and Supply, New Delhi, India, p. 286.
36. Picard T., Cathalifaud-Feuillade G., Mazeta M., Vandensteendam C., (2000), "Cathodic dissolution in the electrocoagulation process using aluminium electrodes". *J. Environ. Monit.*, 2, 77- 80

37. Muruganathan M., Bhaskar Raju G., Prabhakar S., (2004), "Removal of sulfide, sulfate and sulfite ions by electro coagulation". *Journal of Hazardous Materials B109*, 37-44.
38. Rajalo G., Petrovskaya T., (1996), *Environmental Technology* 17, 605.
39. Jung S., Kim Y., Oh Ch., Kang K., Suh K., (2005), "A combined method of electrocoagulation and electrolysis in the treatment of dye wastewater". *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. 38, nº 12, pp 1049-1053.
40. Song Jaemin, Han Mooyoung, Chung Taihak and Choi Sangil, "The effect of coagulation time on the turbidity removal efficiency in electrocoagulation", School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, and Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea.
41. Hiemenz, P., Rajagopalan, R., (1997), "Principles of Colloid and Surface Chemistry". Marcel Dekker, New York.
42. Chou W.-L., Wang Ch.-T., Chang S.-Y., (2009), "Study of COD and Turbidity removal from real oxide – CMP wastewater by iron electrocoagulation and the evaluation of specific energy consumption". *Journal of Hazardous Materials*. Article in press.
43. Kumar M., Ponselvan F. I., Malviya J. R., Srivastava V. Ch., Mall I. D., (2009), "Treatment of bio-digester effluent by electrocoagulation using iron electrodes". *Journal of Hazardous Materials* 165, 345 – 352.
44. Bukhari Alaadin A., (2008), "Investigation of the electrocoagulation treatment process for the removal of total suspended solids and turbidity from municipal wastewater". *Bioresource Technology* 99, 914 -921.
45. Bukhari A. A., Abuzaid N. S. Abdulappa M. K., Essa M. H., (1999), "pretreatment of domestic wastewater in an electrochemical cell. In: The Fifth Saudi Engineering Conference, vol. 3, p 293.
46. Merzouk B., Gourich B., Sekki A., Madani K., Vial Ch., Barkaoui M., (2009), "Studies on the decolorization of textile dye wastewater by continuous electrocoagulation process". *Chemical Engineering Journal* 149, 207 – 214.
47. Fouad Y.O.A., Konsowa A. H., Farag H. A., Sedahmed G. H., (2009), "Performance of an electrocoagulation cell with horizontally oriented electrodes in oil separation compared to a cell with vertical electrodes". *Chemical Engineering Journal* 145, 436 – 440.

48. Alsheyab M., Jiang J. Q., Stanford C., (2009), "On-line production of ferrate with an electrochemical method and its potential application for wastewater treatment – A review". *Journal of Environmental Management* 90, 1350 – 1356.
49. Koninck M. D., Brousse T., Belanger D., (2009), "The electrochemical generation of ferrate at pressed iron powder electrodes: effect of various operating parameters". *Electrochem Acta* 48, 1425 – 1433.
50. Jiang J. Q., (2007), "Research progress in the use of ferrate (VI) for the environmental remediation". *Journal of Hazardous Materials* 146, 617 – 623.
51. Read J. F., John J., MacPherson J., Schaubel C., Theriault A., (2001). "The kinetics and mechanism of oxidation of inorganic oxysulfur compounds by potassium ferrate. Part I. Sulfite, thiosulfate and dithionite ions". *Inorganic Chimica* 315, 96 – 106.
52. Sharma V. K., (2007), "A review of disinfection performance of Fe(VI) in water and wastewater". *Water Science Technology* 55, 225 – 230.
53. Simon W. P., Michael D. K., Jaap V. R., Ropert R., (2002), "The use of hydrous iron (III) oxides for the removal of hydrogen sulphide in aqueous systems". *Water Research* 36, 825 – 834.
54. Kazama F., (1995), "Viral inactivation by potassium ferrate". *Water Science Technology* 31, 165 – 168.
55. Tiwari D., Kim H. U., Choi B. J., Lee S. M., Kwon O. H., Choi K. M., Yang J. K., (2007), "Ferrate (VI): a green chemical for the oxidation of cyanide in aqueous/water". *J. Environ. Sci. Health A Tox. Hazard Subs. Environ. Eng.* 42 (6), 803 – 810.
56. Zongo I., Leclerc J-P., Wéthé J., Lopicque F., Amadou H. M., (2009), "Removal of hexavalent chromium from industrial wastewater by electrocoagulation: A comprehensive comparison of aluminium and iron electrodes". *Separation and Purification Technology* 66, 159 – 166.
57. Heidmann I., Calmano W., (2008), "Removal of Cr(VI) from model wastewaters by electrocoagulation with Fe electrodes". *Separation and Purification Technology* 61, 15 – 21.
58. Zaroual Z., Chaair H., Essadki A.H., El Ass K., Azzi M.al., (2009), "Optimizing the removal of trivalent chromium by electrocoagulation using experimental design". *Chemical Engineering Journal* 148, 488 – 495.
59. Ölmez T., (2009), "The optimization of Cr(VI) reduction and removal by electrocoagulation using response surface methodology". *Journal of Hazardous Materials* 162, 1371 – 1378.

60. Arslan-Alaton I., Kabdash I., Vardar B., Tünay O., (2009), "Electrocoagulation of simulated reactive dye bath effluent with aluminum and stainless steel electrodes". *Journal of Hazardous Materials* 164, 1586 – 1594.
61. Yetilmezsoy K., Ilhan F., Sapci-Zengin Z., Sakar S., Gonullu M. T., (2009), "Decolorization and COD reduction of UASB pretreated poultry manure wastewater by electrocoagulation process: A post-treatment study". *Journal of Hazardous Materials* 162, 120 – 132.
62. Thakur Ch., Srivastava V. Ch., Mall I. D., (2009) "Electrochemical treatment of a distillery wastewater: Parametric and residue disposal study". *Chemical Engineering Journal* 148, 496 – 505.
63. Zongo I., Maiga A. H., Wéthé J., Valentin G., Leclerc J-P., Paternotte G., Lopicque F., (2009), "Electrocoagulation for the treatment of textile wastewaters with Al or Fe electrodes: Compared variations of COD levels, turbidity and absorbance". *Journal of Hazardous Materials*. Article in press.
64. Kabdash I., Vardar B., Arslan-Alaton I., Tünay O., (2009), "Effect of dye auxiliaries on color and COD removal from simulated reactive dye bath effluent by electrocoagulation". *Chemical Engineering Journal* 148, 89-96.
65. Zaied M., Bellakhal N., (2009), "Electrocoagulation treatment of black liquor from paper industry". *Journal of Hazardous Materials* 163, 995-1000.
66. Bennajah M., Gourich B., Essadki A. H., Vial Ch., Delmas H., (2009), "Defluoridation of Morocco drinking water by electrocoagulation/electroflotation in an electrochemical external-loop airlift reactor". *Chemical Engineering Journal* 148, 122-131.
67. Essadki A.H., Gourich B., Vial Ch., Delmas H., Bennajah M., (2009), "Defluoridation of drinking water by electrocoagulation/electroflotation in a stirred tank reactor with a comparative performance to an external-loop airlift reactor". *Journal of Hazardous Materials*, Article in press.
68. Essadki A.H., Bennajah M., Gourich B., Vial Ch., Azzi M., Delmas H., (2008), "Electrocoagulation/electroflotation in an external-loop airlift reactor-application to the decolorization of textile dye wastewater: A case study". *Chemical Engineering and Processing* 47, 1211-1223.
69. Ghernaout D., Badis A., Kellil A., Ghernaout B., (2008), "Application of electrocoagulation in *Escherichia coli* culture and two surface waters". *Desalination* 219, 118-125.

70. Kerwick M. I., Reddy S. M., Chamberlain A. H. L., Holt D. M., (2005) "Electrochemical disinfection, an environmentally acceptable method of drinking water disinfection?" *Electro. Acta*, 50, 5270–5277.
71. Drees K. P., Abbaszadegan M., Maier R. M., (2003), "Comparative electrochemical inactivation of bacteria and bacteriophage", *Water Res.*, 37, 2291– 2300.
72. Mouedhen G., Feki M., De Petris Wery M., Ayedi H. F., (2008), "Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process". *Journal of Hazardous Materials* 150, 124-135.
73. Vivek Narayanan N., Ganesan M., (2009), "Use of adsorption using granular activated carbon (GAC) for the enhancement of removal of chromium from synthetic wastewater by electrocoagulation". *Journal of Hazardous Materials* 161, 575 – 580.
74. Martínez-Huitle C. A., Brillas E., (2009), "Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review". *Applied Catalysis B: Environmental* 87, 105-145.
75. Zhao H-Z., Yang W., Zhu J., Ni J-R., (2009), "Defluoridation of drinking water by combined electrocoagulation: Effects of the molar ratio of alkalinity and fluoride to Al(III)". *Chemosphere* 74, 1391 – 1392.
76. Scott Wade Powell, (2004), "Método y aparato para la electrocoagulación de líquidos". Patente número ES 2 199 557 T3.

## **2. INVESTIGACIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN RECIBIDA**

### **2.1. En relación con el primer objetivo "Conocimiento físicoquímico de la electrocoagulación"**

Chen Guohua (2004), "Electrochemical technologies treatment", ha investigado sobre el desarrollo, el diseño y aplicaciones de tecnologías de electroquímica en el tratamiento de agua y aguas residuales.

El enfoque especial del autor ha ido dirigido a la electrodeposición, a electrocoagulación (EC), a electroflotación (EF) y electro-oxidación. Sostiene que la electrodeposición es eficaz en la recuperación de metales pesados de aguas residuales, mientras que la EC ha sido usada en el

tratamiento y la depuración. Estas tecnologías se aplican usando cualquiera de los electrodos, ya sea de aluminio, hierro o híbridos de Al/Fe. La separación del lodo floculado en el tratamiento de las aguas puede hacerse usando EF. La tecnología de EF es eficaz para retirar partículas coloidales, aceite y grasa, así como contaminantes orgánicos. Se ha demostrado que funciona mejor que la flotación con aireación, la sedimentación, o la flotación forzada.

La electro oxidación está encontrando aplicación en el tratamiento de aguas residuales en combinación con otras tecnologías. Es eficaz para degradar los contaminantes refractarios sobre la superficie de algunos electrodos. Los electrodos de titanio con película de diamante y boro (Ti/BDD) muestran alta actividad y estabilidad razonable. Su aplicación industrial para la producción de ánodo de Ti / BDD, en tamaño grande, se caracteriza por su coste moderado y durabilidad.

El autor en este trabajo realiza una serie de estudios sobre la electrocoagulación. Sostiene que la electrocoagulación involucra la generación de coagulantes in situ por disolución eléctrica de electrodos de aluminio o hierro, generando así iones de aluminio o hierro en el ánodo y generación de hidrógeno en el cátodo. Donde el hidrógeno puede ayudar a ascender a las partículas floculadas, que pueden así ser separados del agua.

Los iones de  $Al^{3+}$  o  $Fe^{2+}$  son coagulantes muy eficaces para la floculación de partículas. Los iones de aluminio hidrolizado pueden formar grandes redes de Al-O-Al-OH, que puede adsorber químicamente contaminantes como el F<sup>-</sup>. Normalmente el Al es usado para el tratamiento de agua y el Fe es usado para la depuración. Las ventajas de la electrocoagulación se concretan en una alta eficiencia en la eliminación de partículas, las instalaciones son compactas con costo relativamente bajo y posibilidad de la automatización completa.

### **Materiales de electrodos**

El investigador ha trabajado con electrodos de placas de aluminio y hierro, y soportes de materiales inertes. Las placas de aluminio son también recomendados para el tratamiento de aguas residuales, solas o en combinación con placas de hierro, debido a la alta eficiencia de coagulación del  $Al^{3+}$ . Dice que, cuando en el agua hay cantidades significativas de iones  $Ca^{2+}$  o  $Mg^{2+}$ , el material del cátodo recomendado es el acero inoxidable.

Los diseños típicos usados, fueron horizontales y verticales dependiendo de la orientación de los electrodos, de forma cilíndrica, consiguiendo separar eficientemente SS del agua a tratar. Otro modelo cilíndrico usado, fue colocar un venturi en el centro del cilindro por donde fluye el agua y coagulante con el fin de conseguir una buena mezcla. Esta prueba la realizó con agua residual de lavandería.

### **Resumen**

La electrocoagulación ha sido usada industrialmente y demostrado su eficacia en el tratamiento de efluentes conteniendo sólidos en suspensión, grasas y aceites, además de los contaminantes orgánicos e inorgánicos, mejorando su eliminación.

Este proceso es compacto y de fácil instalación, los controles pueden ser automáticos. Esta tecnología reemplazará gradualmente las técnicas convencionales de flotación. Por otra parte señala la investigación de varios materiales como el titanio, diamante- boro, para aplicaciones industriales.

### **Mollah M. Y., et al., (2004), "Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation".**

Los autores sostienen que los ánodos de Fe/Al se disuelven generando los iones metálicos correspondientes, y que casi de inmediato se hidroliza a hierro polimérico o a hidróxido de aluminio. Estos hidróxidos poliméricos son excelentes agentes coagulantes. Los ánodos de sacrificio se utilizan para producir continuamente hidróxidos poliméricos en las proximidades del ánodo. La coagulación se produce cuando se combinan estos cationes metálicos con las partículas negativas llevadas hacia el ánodo por electroforesis. Los contaminantes presentes en las aguas residuales son tratados, ya sea por reacciones químicas y precipitación, o por adhesión física y química a materiales coloidales que se generan por la erosión de los electrodos. Los flóculos formados pueden ser retirados por electroflotación o sedimentación, y filtración. En lugar de la adición de productos químicos coagulantes convencionales, estos agentes son generados in situ.

El agua es también electrolizada en una reacción paralela, produciéndose pequeñas burbujas de oxígeno en el ánodo y de hidrógeno en el cátodo. Estas burbujas atraen partículas floculadas y, a través de la flotabilidad natural, los contaminantes floculados flotan en la superficie. Además, pueden darse las siguientes reacciones fisicoquímicas en la celda de EC:

- Catódica, reducción de las impurezas presentes en las aguas residuales.
- Liberación y coagulación de las partículas coloidales.
- Migración electroforética de los iones en solución.
- Electroflotación de las partículas coagulada por burbujas de H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> producidas en los electrodos.
- Reducción de los iones metálicos en el cátodo.
- Otros procesos químicos y electroquímicos.

En un experimento de electrocoagulación el electrodo o electrodos suelen estar conectados a una fuente externa de corriente continua. La cantidad de metal disuelto o depositado depende de la cantidad de electricidad que pasa a través de la solución electrolítica. Una simple relación entre la intensidad de corriente (A cm<sup>-2</sup>) y la cantidad de sustancia disuelta (M) (g de M cm<sup>-2</sup>) pueden deducirse de la ley de Faraday.

$$w = \frac{itM}{nF}$$

Donde, w es la cantidad de material depositado, i es la densidad de corriente en (A cm<sup>-2</sup>), t es el tiempo en segundos, M masa molar del material del electrodo, n es el número de electrones en la reacción de oxidación/reducción, F es la constante de Faraday 96500 C mol<sup>-1</sup>.

Se espera que haya una concordancia entre la cantidad de sustancias disueltas calculadas, como resultado de paso de una cantidad definida de electricidad y la cantidad determinada experimentalmente. Por lo general, se obtiene una buena concordancia a pesar que puede introducirse errores importantes si no se presta atención a la geometría de ensamblaje de los electrodos, así como las condiciones óptimas de la celda de EC. El potencial medido es la suma de los tres componentes.



$$\eta_{AP} = \eta_{\kappa} + \eta_{Mt} + \eta_{IR}$$

Donde  $\eta_{AP}$  es el sobrepotencial aplicado en (V),  $\eta_{\kappa}$  el sobrepotencial cinético en (V),  $\eta_{Mt}$  es sobrepotencial de la concentración (V),  $\eta_{IR}$  el sobrepotencial causado por la resistencia de la solución (V).

La caída de la resistencia está relacionada con la distancia (d en cm) entre los electrodos, área superficial (A en m<sup>2</sup>) del cátodo y la conductividad específica de la solución (k en mSm<sup>-1</sup>) y corriente (I en A) por la ecuación siguiente:

$$\eta_{IR} = \frac{Id}{Ak}$$

La caída de la resistencia puede ser fácilmente minimizada por la disminución de la distancia entre los electrodos y el aumento de la zona de sección transversal de los electrodos y la conductividad específica de la solución. Sobrepotencial de concentración ( $\eta_{Mt}$ , V), también conocida como la transferencia de masa o sobrepotencial de difusión, es causada por el cambio en la concentración de electrolitos en la proximidad de la superficie de los electrodos debido a la reacción de electrodos. Este sobrepotencial es causado por las diferencias en la concentración de las especies electroactivas entre el volumen de la solución y la superficie del electrodo. Esta condición ocurre cuando la reacción electroquímica es lo suficientemente rápida para reducir la concentración de las especies electroactivas en la mayor parte de la solución. Un sobrepotencial pequeño debido a la concentración es insignificante cuando la constante de velocidad de reacción es mucho más pequeña que el coeficiente de transferencia de masa. El sobrepotencial debido al transporte de masa ( $Mt \eta$ , V) se puede reducir por el aumento de la masa de los iones metálicos transportado de la superficie del ánodo a la mayor parte de la solución, que se puede lograr aumentando la turbulencia de la solución. También se puede superar por el paso de la solución electrolítica del ánodo al cátodo a mayor velocidad mediante el uso de algunos medios mecánicos. El sobrepotencial cinético (también llamado potencial de activación) tiene su origen en la energía de activación barrera para las reacciones de transferencia de electrones.

El sobrepotencial de activación es especialmente alto para la generación de los gases en ciertos electrodos. Sin embargo, los efectos de estos cambios no han sido investigados en profundidad para especies específicas en solución acuosa. Se han hecho muy pocos trabajos que caractericen los depósitos en los electrodos.

Los investigadores puntualizan que para obtener una máxima eficiencia en el proceso se deben tener en cuenta los siguientes factores en el diseño de una celda de electrocoagulación (Paul A., 1996):

- Se debe minimizar la caída de la resistencia entre los electrodos. Esta caída depende (1) de la conductividad de la solución electrolítica, por lo tanto, para minimizar la caída se puede usar soluciones de conductividad elevada. (2) de la distancia entre electrodos, para ello se debe disminuir la distancia entre electrodos. (3) de la geometría de los electrodos.
- Minimizar la acumulación de gases H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> en la superficie del electrodo
- Los obstáculos para la transferencia de masa entre los espacios de los electrodos deben ser mínimos

**Lee, Ming Shing. (2000) "Tratamiento del agua por medio de electroflotación y electrocoagulación".**

El autor ha descubierto que cuando se disponen varias placas conductoras entre el cátodo y el ánodo, y los electrodos y las placas conductoras se disponen para formar un circuito de flujo de una vía, ascendente, cerrado y con forma de S, las impurezas del agua coagulan formando un conglomerado en un tiempo muy corto, por ejemplo, de 1 minuto, si se genera un campo eléctrico con una intensidad suficiente entre los dos electrodos mediante la aplicación de un voltaje apropiado al cátodo y al ánodo.

Dice que cuando se ejecuta un procedimiento electroquímico, se producen simultáneamente seis funciones básicas entre los dos electrodos y en la solución electrolítica:

Oxidación: Se proporcionan electrones al ánodo para oxidar las impurezas presentes en la solución;

Reducción: Se proporcionan electrones por el cátodo para reducir las impurezas presentes en la solución;

Electroforesis: Los iones con carga o cargas positivas se mueven desde el ánodo al cátodo; mientras que los iones con carga o cargas negativas se mueven desde el cátodo al ánodo;

Ataque electroquímico: Si el ánodo está hecho de un metal barato, el ánodo se somete a una ionización de modo de oxidación para liberar cationes mediante la aplicación de un voltaje adecuado entre los dos electrodos, para hacer que la solución tenga la conductividad apropiada.

Electrólisis: El agua se descompone en hidrógeno y oxígeno.

Polarización: Las impurezas y las moléculas de agua se polarizan en respuesta a la aplicación del campo eléctrico formado entre los dos electrodos cuando se aplica el voltaje adecuado, de forma que los iones con carga o cargas negativas se acumulan cerca del ánodo y los iones con carga o cargas positivas se acumulan cerca del cátodo

El fenómeno de la coagulación rápida en un periodo de tiempo muy corto no puede explicarse por el principio de coagulación electrolítica convencional.

Cuando se aplica un voltaje apropiado entre el cátodo y el ánodo, de forma que se genera un campo eléctrico con una intensidad suficiente entre los electrodos, las impurezas y las moléculas de agua de la solución se polarizan bajo el campo eléctrico, es decir, el extremo adyacente al ánodo lleva cargas negativas mientras que el otro extremo adyacente al cátodo lleva cargas positivas.

La función de polarización hace que las impurezas, tales como las moléculas de la solución y las microburbujas sólidas presentes en el volumen de agua, se polaricen convirtiéndose en partículas que llevan alternativamente cargas positivas y cargas negativas. Además, todas las partículas, que llevan cargas mutuamente repulsivas o sin carga, se convierten en partículas que llevan cargas mutuamente atractivas y, por lo tanto, se produce el fenómeno de coagulación.

Las placas conductoras dispuestas entre el ánodo y el cátodo facilitan la coagulación de las partículas de impurezas, pero sigue sin conocerse el mecanismo de este efecto. Se deduce que el mecanismo puede tener relación con la mejor transferencia de energía debida a la generación de un microcampo eléctrico sobre las propias placas conductoras. Después de la inducción de las impurezas, para que lleven cargas bipolares y para conseguir un efecto mutuamente atractivo y un efecto de coagulación adicional, se requieren otros efectos para hacer que las impurezas pequeñas dispersas choquen entre sí para formar un conglomerado de mayor tamaño que pueda separarse del volumen de agua más fácilmente que uno pequeño. La colisión entre las impurezas puede conseguirse de las siguientes formas:

#### Agitación macroscópica:

Las impurezas pueden chocar entre sí en el volumen de agua a través de una agitación mecánica. Las placas conductoras presentes en el depósito de procesamiento pueden disponerse para formar un circuito con forma de S de manera que el volumen de agua pueda fluir de forma invertida bajo un campo eléctrico para conseguir el efecto de agitación mecánica.

#### Turbulencias microscópicas:

Las dimensiones de algunas de las impurezas son muy pequeñas, incluso tan pequeñas como una molécula o un estado iónico. La agitación mecánica sólo puede hacer que se desplacen las impurezas macroscópicamente, permaneciendo constante la distancia entre las impurezas pequeñas. En otras palabras, las moléculas de impurezas no colisionarán entre sí para combinarse en un conglomerado. Para solucionar este problema, la presente invención ha inducido a las impurezas para que lleven cargas, y después acelera las cargas para formar una corriente unidireccional y generar adicionalmente un campo magnético perpendicular a la dirección del flujo. Como cada una de las impurezas separadas forma a su alrededor su propio campo magnético independiente, la interacción entre estos campos magnéticos fuerza a las impurezas a desplazarse de una forma ligeramente lateral a lo largo de la dirección del campo magnético, y este pequeño desplazamiento lateral se convertirá en un mayor desplazamiento lateral después de un trayecto. Las diferentes impurezas llevan diferentes cargas, de manera que forman a su alrededor diferentes intensidades de campos magnéticos. Por lo tanto, los

desplazamientos laterales de las impurezas también serán diferentes, permitiéndose de esta forma la colisión entre las impurezas.

Basándose en las observaciones anteriores, el inventor describe un método que incluye una etapa de usar un depósito de procesamiento sustancialmente sellado, en cuyas partes superior e inferior están dispuestos respectivamente un orificio de salida de agua y un orificio de entrada de agua, y en cuyo espacio interior existen tres o más placas conductoras en relación sustancialmente paralela con el fondo del depósito y en relación sustancialmente paralela entre sí para formar de forma ascendente un circuito de flujo de una vía, con forma de S, sustancialmente cerrada en el depósito de procesamiento, donde las placas conductoras están hechas de un material conductor que tiene una resistividad que varía de  $1,59 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  a  $1300 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  y al menos dos de las placas conductoras están conectadas eléctricamente con una fuente de alimentación positiva y negativa, respectivamente, para servir como ánodo y cátodo, donde el agua a tratar se introduce en el depósito de procesamiento por el orificio de entrada de agua, fluye hacia arriba a través del circuito de flujo de una vía con forma de S y después se descarga del depósito de procesamiento por el orificio de salida de agua, y donde se aplica un voltaje al cátodo y al ánodo para generar un campo eléctrico que tiene una intensidad que varía de  $0,5 \text{ mV/cm}$  a  $1000 \text{ V/cm}$  durante el flujo del volumen de agua en el circuito de flujo, polarizando y coagulando de esta manera las impurezas presentes en el volumen de agua para eliminar las impurezas coaguladas.

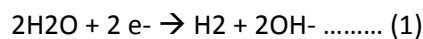
El autor asegura que con su invención se puede tratar cualquier tipo de agua residual industrial y agua contaminada, por ejemplo, lixiviados de basuras, aguas residuales vertidas a ríos, aguas residuales de procesos de tintes, aguas residuales de electrodeposición, aguas residuales del procesamiento de la pasta papelera, agua residuales del tratamiento químico del petróleo, aguas residuales de mantenimiento de automóviles, agua residuales de fermentación, aguas residuales de fábricas de helados, aguas residuales de restaurantes, aguas residuales de hospitales, aguas residuales de laboratorios, etc. Además dice que el agua a tratar puede ser ácida, neutra o básica, es decir, cualquier volumen de agua que tenga un valor de pH comprendido entre 0 y aproximadamente 14 y con una conductividad que varía entre  $0,98 \mu\text{S/cm}$  y  $254 \text{ mS/cm}$ . En cuanto a la concentración de impurezas, las impurezas pueden tratarse directamente si su concentración varía de 0 a 105 ppm, mientras que si su concentración es mayor de 105 ppm, tiene que realizarse preferiblemente otra etapa previa.

**Picard T., et al., (2000), "Cathodic dissolution in the electrocoagulation process using aluminium electrodes".**

Los investigadores han estado interesados en determinar qué tipo de reacciones se producen en el cátodo. Para ello, han elaborado un aparato piloto dividido en dos compartimentos, que permite la medición de la formación de gas que tiene lugar sólo en un compartimento.

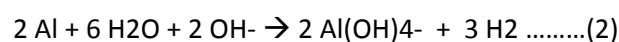
Las soluciones utilizadas en el proceso experimental se han preparado usando agua ultrapura, con una resistividad alta mayor que 15 MΩ.cm, concentración de carbono orgánico total menor que 10 µg/l, pH 5,5 – 6,00. La solución utilizada fue de cloruro de sodio 0,6 mol/l y una intensidad de corriente entre 1 y 10 A.

Realizaron mediciones de los gases de hidrógeno por espectrometría de masa con helio como gas portador. Para validar el protocolo experimental, el primer experimento lo realizaron con un cátodo de acero inoxidable. Los resultados han indicado que la cantidad de hidrógeno creado está en relación con los valores calculados utilizando la segunda la ley de Faraday, correspondiente a la reacción de reducción del agua.



Han observado que cuando dan corriente hay formación de hidrógeno y cuando quitan la corriente no hay más generación de hidrógeno, este fenómeno fue observado con todas las intensidades de corriente, por lo que sostienen que el hidrógeno generado ha sido solo debido a la reacción electroquímica.

Los experimentos realizados con cátodo de aluminio, con las mismas intensidades, han demostrado que la formación de hidrógeno, fue mayor que los generados con el cátodo de acero inoxidable. Explican que la generación de hidrógeno no solo es debido a la reacción electroquímica ya que, cuando apagaban la corriente, seguía habiendo generación de hidrógeno y esto era debido a una reacción química:



De acuerdo a las observaciones anteriores los investigadores concluyen que la formación de hidrógeno es debido a 2 reacciones, una electroquímica (1) y otra puramente química ya que ocurre sin corriente (2).

El hidrógeno generado con el cátodo de aluminio es el hidrógeno total generado por la aplicación de intensidad de corriente, donde el hidrógeno químico es debido al ataque químico de la placa de aluminio por iones hidroxilos y el hidrógeno electroquímico es resultado de la reducción del agua.

$$H_2 \text{ (total)} = H_2 \text{ (electroquímico)} + H_2 \text{ (química)}$$

Dicen que el problema es saber si los iones de aluminio procedentes de ésta reacción química tiene la misma eficacia como las que provienen del ánodo y si pueden reaccionar con los contaminantes que se desea eliminar.

**Mollah M. Y., et al., (2001), "Electrocoagulation (EC)- science and applications"**

Los investigadores sostienen que la teoría de la EC ha sido discutida ya por varios autores. Concuerdan en que, en general el proceso EC incluye tres etapas sucesivas:

(a) Formación de coagulantes por oxidación electrolítica de "electrodos de sacrificio ", (b) desestabilización de: contaminantes, partículas en suspensión, y la rotura de emulsiones, (c) la agregación de los coágulos a forma de flóculos. El mecanismo de desestabilización de los contaminantes, partículas en suspensión, y rotura de las emulsiones lo resumieron de la siguiente manera:

1. Compresión de la doble capa difusa alrededor de las especies cargadas, que se logra por las interacciones de los iones generados por la disolución del electrodo de sacrificio, debido al paso de corriente a través de la solución.
2. Neutralización de las cargas de las especies iónicas presentes en las aguas residuales, el cual es causada por los iones opuestos, producido por la disolución de la electroquímica de electrodos de sacrificio. Estos iones opuestos reducen la repulsión electrostática entre partículas suficientemente para que predomine la atracción de

van der Waals, causando así la coagulación. Resultando en el proceso una carga neta cero.

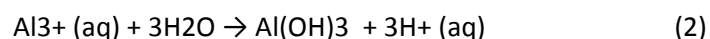
3. Formación del flóculo como resultado de que la coagulación crea un manto de lodos, que unen puentes coloidales y partículas que no han sido complejas.

### **Tipos de reacciones que involucran el proceso de electrocoagulación**

#### **Con electrodos de aluminio**

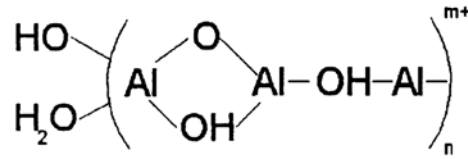
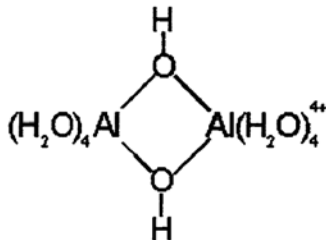
El mecanismo de la EC es altamente dependiente de la composición química del medio acuoso, especialmente la conductividad. Además, otras características, como el pH, el tamaño de las partículas, y las concentraciones de constituyentes químicos también influyen en el proceso de EC. Los mecanismos de eliminación de los iones por EC, lo explican con dos ejemplos concretos de aluminio y el hierro, ya que estos dos metales han sido y son ampliamente utilizados para depurar las aguas residuales.

La EC de aguas residuales con electrodos de aluminio han sido reportadas por otros investigadores [Chen L. (1985); Vick E., et al., (1984); Prisyazhnyuk B. et al., (1992); Walsh F., et al., (1994); Ming L., et al., (1983)]. La disolución electrolítica del ánodo de aluminio produce especies catiónicas monoméricas como el  $Al^{3+}$  y  $Al(OH)_2^+$  a pH bajo, y con un valor de pH apropiado, primero se transforma a  $Al(OH)_3$  y finalmente es polimerizado a  $Al_n(OH)_{3n}$ , según la siguiente reacción:



Así mismo, dependiendo del pH del medio acuoso, otras especies iónicas pueden también presentarse en el sistema, como pueden ser:  $Al(OH)_2^+$ ,  $Al_2(OH)_2^{4+}$ ,  $Al(OH)_4^-$ . Según el examen del diagrama de equilibrio pE-pH, los investigadores dicen que, bajo condiciones apropiadas, pueden constituirse varias formas de hidróxido  $Al^{3+}$  multimérico, como pueden ser un hidróxido dimérico o polimérico que se muestra a continuación:



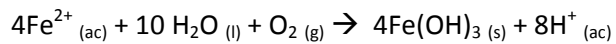


### Con electrodos de hierro

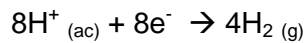
La oxidación del hierro en un sistema electrolítico produce hidróxidos de hierro  $\text{Fe}(\text{OH})_n$ , donde  $n = 2$  o  $3$ .

#### Mecanismo 1

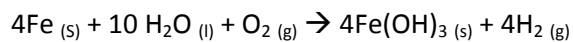
- **Ánodo**



- **Cátodo**

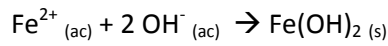
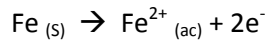


- **Global**

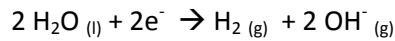


**Mecanismo 2**

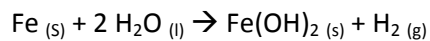
- **Ánodo**



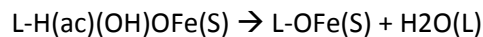
- **Cátodo**



- **Global**



El  $\text{Fe}(\text{OH})_n$  (S) formado permanece en la corriente acuosa como una suspensión gelatinosa, el cual puede remover contaminantes de las aguas residuales por complejación o atracción electrostática, seguida de coagulación. En la superficie del modo complejación los contaminantes actúan como ligando (L) para unirse químicamente al hierro hidratado.



Los investigadores han encontrado que se pueden eliminar los metales pesados por absorción y adsorción con hidróxido polimérico de  $\text{Fe}^{+3}$  o  $\text{Al}^{+3}$ . La ventaja de usar electrodos de hierro en tratamientos de agua es por su inocuidad frente al aluminio que presenta algunos efectos tóxicos.

**Alsheyab M., et al., (2009), "On-line production of ferrate with an electrochemical method and its potential application for wastewater treatment – A review"**

Los autores han hecho un análisis bibliográfico sobre la producción del ión ferrato (VI) in situ por método electroquímico y su uso en el tratamiento de aguas residuales. Realizan una introducción de la química del ferrato y el rendimiento general del tratamiento químico del agua. Posteriormente analizan los factores que afectan la eficiencia del ferrato por el método electroquímico, es decir, el tipo y propiedades de materiales anódicos, el tipo y las concentraciones de electrolitos, la densidad de corriente y las configuraciones del electrodo.

El hierro tiene diferentes estados de oxidación, los más comunes son 2+ y 3+, pero el estado de oxidación más alto es 6+. El ferrato ( $\text{FeO}_4^{2-}$ ) por su elevada oxidación tiene un alto rendimiento en la degradación de compuestos que pueden contaminar el agua como compuestos inorgánicos tales como oxisulfuros [Read et al., 2001], tioureas, y tioacetamidas [Sharma 2002],  $\text{H}_2\text{S}$ , los cuales son convertidos completamente a sulfatos. Los compuestos orgánicos como metanol, etanodiol, fenol, etc., pueden ser oxidados a  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  a temperatura ambiente [Denver and Pletcher, 1996 a, b]. Los compuestos de cianuros en las aguas residuales pueden ser oxidados en pocos minutos [Tiwari et al., 2007].

En desinfección el rendimiento del ferrato (VI) fue de 99,9% en la eliminación de coliformes totales [Jiang et al., 2007]. También han reportado que el ferrato puede inactivar virus como F2 y QB a pH 6-8 [Kazama, 1995].

El ión ferrato (VI), se puede obtener con un ánodo de sacrificio, en una celda electroquímica conteniendo una solución fuertemente alcalina NaOH ó KOH, aplicando una corriente eléctrica para oxidar el hierro a Fe(VI). La ecuación básica es la siguiente:

Reacción en el ánodo:  $\text{Fe} + 8 \text{OH}^- \rightarrow \text{FeO}_4^{2-} + 4 \text{H}_2\text{O} + 6\text{e}$

Reacción en el cátodo:  $3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{H}_2 + 6 \text{OH}^- - 6\text{e}$

Sostienen que según Koninck et al., (2003), la formación electroquímica del ferrato sucede en tres pasos: (1) formación de especies intermedias, (2) formación del ferrato y pasivación del electrodo, (3) formación de la capa pasivante que impide futura generación de ferrato. Los

principales elementos que afectan a la producción del ferrato (VI) son la composición del ánodo, tipo y concentración del electrolito, densidad de corriente y diseño de la celda.

## **2.2. En relación con el segundo objetivo “Influencia sobre la electrocoagulación de parámetros físicos, como pH, conductividad y otros”**

**Chen Guohua (2004), “Electrochemical technologies treatment”**

El autor ha investigado sobre los factores que afectan a la electrocoagulación, debiendo destacar los siguientes:

### **Densidad de corriente o régimen de carga,**

Sostiene que el suministro de corriente en el sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de  $Al^{3+}$  o  $Fe^{2+}$  liberados de los respectivos electrodos. Una corriente grande representa una pequeña unidad de electrocoagulación. Además, cuando se usa una corriente demasiado grande hay oportunidad alta de malgastar energía eléctrica en calentar el agua.

Para operar el sistema de electrocoagulación, por un periodo de tiempo largo sin mantenimiento, su densidad de corriente está indicada dentro de 20 – 25 A/m<sup>2</sup>, debiéndose tomar medidas de limpieza periódica de la superficie de los electrodos. La selección de densidad de corriente debe hacerse en relación con otros parámetros de operación como pH, la temperatura, así como la medida del caudal debe asegurar una eficiencia alta de corriente.

La eficiencia de corriente para electrodos de aluminio puede ser de 120 - 140 % mientras que para electrodos de hierro es alrededor de 100 %.

El 100% de la eficiencia de la corriente para aluminio se atribuye al efecto de las picaduras de la corrosión, especialmente cuando hay iones de cloro presentes. La eficiencia depende de la densidad de corriente así como de los tipos de los aniones. La eficiencia de la corriente

aumenta significativamente, hasta 160 %, cuando se aplica una frecuencia baja de sonido a electrodos de hierro.

La calidad del agua tratada depende de la cantidad de iones producidos (mg) o densidad de carga, del producto de corriente y tiempo (amperio hora (A h)).

### **Presencia de cloruro de sodio (NaCl)**

Las sales usualmente son empleados para incrementar la conductividad del agua o del agua residual a tratar. Además de su contribución iónica en conducir la carga eléctrica, se descubrió que los iones cloruro podían reducir el efecto adverso de otros aniones como  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  significativamente. La existencia de los iones de carbonato o sulfatos, podría llevar a precipitación a los iones de  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{Mg}^{2+}$ , que forma una capa aislante sobre la superficie de los electrodos. Esta capa aislante incrementaría el potencial bruscamente entre electrodos y daría como resultado un decrecimiento importante de la eficiencia de la corriente. En este sentido es recomendable que la cantidad de aniones presente, debe haber 20% de  $\text{Cl}^-$  para asegurar una operación normal de electrocoagulación en el tratamiento de agua. La adición del NaCl debería también llevar a un decrecimiento en el consumo de potencia porque hay un incremento de la conductividad.

### **Efecto del pH**

El efecto del pH sobre la electrocoagulación, en agua y en aguas residuales, influye en la eficiencia de la corriente así como en la solubilidad de los hidróxidos metálicos. Generalmente se encontró que la eficiencia, con electrodos de aluminio, es buena en condiciones ácidas o alcalinas, así como en condiciones de pH neutro. La eficiencia del tratamiento depende de la naturaleza de los contaminantes, la mejor remoción de los contaminantes se encontró a pH cercano a 7 para electrodos de aluminio. El consumo de potencia es también alto a pH neutro debido a la variación de la conductividad. Cuando la conductividad es alta, el efecto del pH no es significativo.

Cuando se usan electrodos de hierro, en el tratamiento de agua residual, las condiciones alcalinas son más adecuadas. En la industria textil se encontró una mejor eliminación del color y de la demanda química de oxígeno en condiciones alcalinas.

### **Efecto de la Temperatura**

Cuando la temperatura es alta, hay una disminución del tamaño de los poros del gel de hidróxido de aluminio, resultando flóculos más compactos, que pueden generar depósitos sobre la superficie del electrodo. El consumo de energía también da un máximo, a valores ligeramente inferiores a una temperatura de 35°C, en el tratamiento de aguas residuales conteniendo aceites. Esto se explica por los efectos opuestos de la temperatura sobre la eficiencia corriente y la conductividad del agua residual. La temperatura más alta da por lo tanto un consumo de energía más bajo, y una conductividad más alta.

### **Suministro de energía**

Cuando la corriente pasa a través de un reactor electroquímico, éste debe vencer la diferencia del potencial de equilibrio, el sobrepotencial del ánodo, el sobrepotencial del cátodo y el sobrepotencial óhmico de la solución [Scott K., 1995].

Normalmente se emplea una fuente de alimentación de corriente continua. Con el fin de minimizar la oxidación y pasivación de la superficie de los electrodos, la dirección de la fuente de alimentación se cambiada a cierto intervalo de tiempo. Los autores han encontrado que cada 15 minutos es un óptimo para el tratamiento de agua usando electrodos de aluminio. También usaron una fuente de alimentación de corriente alterna con 6 electrodos de aluminio (tres pares) en el tratamiento de aguas residuales coloidales procedentes de la industria petroquímica.

### **Chen G., et al. (2000), "Electrocoagulation and electroflotation of Restaurant Wastewater".**

Los autores realizaron la investigación en una planta de electrocoagulación con electrodos de placas de aluminio de 55 x 100 x 3 mm, con un área efectiva de 50 cm<sup>2</sup>, el espacio entre electrodos fue de 4 mm. La celda de electroflotación tenía como ánodo electrodos de Ti/IrO<sub>2</sub> TaO<sub>5</sub>, el cátodo fue una pieza de acero inoxidable.

### **Efecto de la densidad de carga sobre la electrocoagulación**

En la electrocoagulación el coagulante  $Al^{3+}$  es producido por el sacrificio electroquímico del ánodo de aluminio. Esta dosis está determinada por la densidad de carga, teóricamente de acuerdo a las leyes de Faraday, siempre que 1 Faraday de carga pasa a través de un circuito, 9,0 g de aluminio es disuelto de cada ánodo de una unidad de electrocoagulación bipolar.

Las eficiencias alcanzadas con una densidad de carga  $> 1.87$  faradios/ $m^3$  de agua fueron como sigue: Para la DQO fue de un 67%, para aceites y grasas  $> 97\%$  y alrededor de un 90% para SS. El pH del agua era de 6.94,  $T^{\circ} = 30,4$  °C, Tiempo de retención de 15 minutos, densidad de carga en la electroflotación = 0,93 faradios/ $m^3$  de agua.

### **Efecto del tiempo de retención**

La electrocoagulación involucra 2 etapas desestabilización y agregación. La primera etapa usualmente es corta, mientras que la segunda etapa es relativamente larga. En la investigación el efecto del tiempo de retención sobre la eficiencia del tratamiento fue llevado bajo una densidad de carga fija. El cual se consiguió cambiando la velocidad de flujo del agua residual en proporción con la corriente aplicada. El tiempo de retención no ha tenido un efecto significativo sobre la eliminación de los contaminantes, con el tiempo de retención más corto como 4,3 minutos, la eficiencia en la eliminación de aceites y grasas fue del 99%, para la DQO 88%, y para SS el 98%.

### **Efecto del pH**

Los investigadores han examinado el efecto del pH de un influente, utilizando un proceso combinado de electrocoagulación-electroflotación. El agua residual fue ajustada el pH en cada experimento, usando hidróxido de sodio o ácido sulfúrico. El pH del influente no afectó significativamente a la eficacia de eliminación. Específicamente la eliminación de aceites y grasas fue del 98%, en un rango de pH de 2,6 – 10. La eliminación de los SS se vio empeorada solamente cuando el pH era menor de 4. Similarmente una ligera caída de la eliminación de la DQO se observó a  $pH < 3$  y  $pH > 9$ .

**Efecto de la conductividad**

Los autores, para medir la variación de la conductividad en las muestras del agua residual, ajustaron la conductividad, a niveles deseados, mediante la adición de una cantidad apropiada de NaCl. Al parecer la eficiencia de eliminación de contaminantes no fue afectada significativamente por la conductividad del agua residual en el rango investigado de 498 y 4650  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Han observado que la eliminación de la DQO se mantiene al mismo nivel. Mientras que los SS y los aceites y grasas estaban por encima del 85% y 95% respectivamente del rendimiento óptimo.

La conductividad puede afectar fuertemente el voltaje de la electrólisis. Cuando la conductividad se incrementa de 498 a 4650  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , el voltaje aplicado entre electrodos decreció de 6,2 a 1,8 V en la celda de electrocoagulación y de 9,9 a 3,9 V en la celda de electroflotación. A este respecto, han establecido que la densidad de carga es un factor primario que afecta la eliminación de contaminantes.

**Xueming Chen, Guohua Chen, Po Lock Yue. (2002). *Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation*. Chemical engineering science 57, 2449-2455.**

En este trabajo los investigadores verifican que la electrocoagulación es un proceso efectivo para desestabilizar coloides en los tratamientos de aguas potables, residuales e industriales.

Muestran las reacciones y ecuaciones del transporte de iones durante la electrólisis, así como el sobrepotencial necesario para vencer la capa de difusión y para que la electrólisis transcurra a la velocidad deseada.

Estudian el voltaje suministrado en las celdas electroquímicas actuando sobre ánodos de sacrificio de aluminio y hierro, para producir los iones de  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$  de marcado efecto coagulante.

Se muestra un equipo experimental para estudiar los efectos del pH, caudal, densidad de corriente y conductividad eléctrica de las aguas a tratar.



Suministran dos modelos matemáticos aplicables a electrodos de aluminio pasivado y no pasivado.

### **2.3. En relación con el tercer objetivo, “Eficacia de la electrocoagulación en la eliminación de turbidez”**

**M. Pouet et al., 1995**, han experimentado en una planta piloto de electrocoagulación-flotación utilizando como influente agua residual urbana con una turbidez de 254 NTU y el efluente tratado con una turbidez de 20 NTU, el rendimiento alcanzado por los investigadores fue en promedio de un 90%.

**Jung S., et al., (2005)**, han realizado una investigación sobre un método combinado de electrocoagulación y electrólisis, para el tratamiento de agua residual de tintura. En la investigación han utilizado agua sintética contaminada con diferentes tipos de tinte.

El efluente tenía una turbidez que variaba entre 339 – 1253 NTU. Han observado que en el caso de la electrocoagulación cuando los SS estaba por debajo de los 10 mg/l la turbidez estaba por debajo de 8 NTU el rendimiento era positivo, pero si los SS eran más altos que 10 mg/l, la turbidez se incrementaba drásticamente con el incremento de los SS.

Al trabajar con electrocoagulación seguido de una electrólisis la turbidez estuvo por debajo de 8 NTU independientemente de los SS. Este fenómeno lo explican que ha sido debido a que los contaminantes finos que causan la turbidez pueden ser destruidos por las reacciones de oxidación durante la electrólisis.

**Song J., et al., (2000), “The effect of coagulation time on the turbidity removal efficiency in electrocoagulation”.**

Los autores sostienen que, sobre la base de la teoría de la coagulación, el tiempo de electrocoagulación puede dividirse en dos: tiempo de electrólisis y tiempo de floculación. Los efectos de ambos tiempos han sido investigados por un conjunto de experimentos con agua sintética de baja y de alta turbidez, que fueron preparados de con caolín. El agua de baja

turbidez estaba entre 8-10 NTU, el agua de alta turbidez estaba entre 180-190 NTU, el pH de las soluciones estaba entre 6,8 – 7,3, y la Tº entre 15 -18ºC.

El experimento se llevó a cabo en una celda de Electrocoagulación de 10,5 x 10,5 x 22 cm, de 2 l de capacidad. Usaron 2 pares de electrodos de placas de aluminio de 8 x 10 cm, el espacio entre electrodos fue de 0,5 cm, la fuente de alimentación de electricidad fue de 24 V.

Los investigadores consideran que el efecto del tiempo de floculación es más importante que el tiempo de la electrólisis para mayor eficiencia. Por lo tanto, sugieren que es preferible que, después de la electrólisis, siga el proceso de floculación para lograr una buena eliminación de la turbidez.

Han considerado como el rango del tiempo de coagulación, la suma del tiempo de electrólisis y de floculación, que lo han decidido sobre la base de las directrices de diseño del proceso de coagulación convencional utilizados en el tratamiento de las aguas. El tiempo de electrólisis varió entre cero y 60 segundos. El tiempo de floculación varió entre cero y 20 minutos. Las muestras para la el análisis lo han tomado después de 30 minutos de sedimentación.

Como conclusiones los investigadores dicen que: Para el agua de baja turbidez, la eficiencia aumenta hasta aproximadamente el 80% después de 30 segundos de tiempo de electrólisis. Para el agua de alta turbidez, la eficiencia por encima de los 85 % se alcanza a los 10 segundos de electrólisis y permanece casi constante hasta los 60 segundos. Esto fue después de 5 min de floculación y 30 minutos de sedimentación. Los resultados han mejorado para ambas soluciones cuando la floculación fue de 16 minutos seguida de 30 minutos de sedimentación, alcanzándose una eficiencia de eliminación de la turbidez por encima del 90%.

**Chou W.-L., et al.,(2009), “Study of COD and Turbidity removal from real oxide – CMP wastewater by iron electrocoagulation and the evaluation of specific energy consumption”.**

Los investigadores han realizado sus experimentos en un vaso de pirex de 1 litro equipado con baño de recirculación y agitación magnética. Para ello, han usado una combinación de placas de hierro/aluminio como ánodo/cátodo.

El agua residual a tratar tenía las siguientes características: pH de 8 – 9, conductividad de 100 – 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , Turbidez de 200 – 300 NTU, DQO 300 – 600 mg/l, sólidos totales de 4000 – 5000 mg/l, y SS de 10 -20 mg/l.

Han realizado estudios sobre el efecto de la concentración del electrolito en la solución a tratar. Sostienen que la conductividad de la solución afecta al voltaje, a la eficiencia de la corriente eléctrica y al consumo de la energía en una celda electrolítica.

Debido a que el agua residual a tratar tenía una conductividad muy baja han realizado pruebas con diferentes concentraciones de electrolito (100, 200 y 300 mg/l de NaCl) con el fin de aumentar la conductividad. Para investigar la influencia del electrolito sobre la eficiencia de eliminación de la DQO, han aplicado un voltaje de 20V, y han observado que al aumentar el tiempo de electrólisis se incrementa la eliminación de la DQO. La eficiencia de eliminación de la DQO después de 20 minutos fue de 78%, 85% y 92% para 100 mg/l, 200 mg/l, 300 mg/l de NaCl respectivamente. Con un tiempo de sedimentación de 5 horas.

En relación a la turbidez, han encontrado una eliminación en más del 90% en menos de 20 minutos de tiempo de electrólisis para concentraciones de 200 y 300 mg/l. Sin embargo, este aumento de la concentración del NaCl a 300 mg/l, no mejora de forma significativa la reducción del tiempo de electrolisis. Concluyen que un exceso de NaCl puede ser perjudicial para la eliminación de la turbidez.

**Bukhari Alaadin A., (2008), “Investigation of the electrocoagulation treatment process for the removal of total suspended solids and turbidity from municipal wastewater”.**

El investigador ha tratado agua residual urbana mediante electrocoagulación para eliminar sólidos suspendidos, turbidez y DBO usando como electrodos placas de acero inoxidable. La capacidad de la celda era de 1,5 litros, cada electrodo tenía una superficie activa de 44  $\text{cm}^2$  y el espacio entre electrodos era de 3 cm. La corriente aplicada fueron 0,05, 0,1, 0,2, 0,4, y 0,8 A. Para cada corriente el tiempo de contacto fue 5, 10, 20, 30 y 50 minutos.

Los parámetros del influente eran: SST 126 -160 mg/l, turbidez 49 – 53 NTU, DBO particulada 51 – 84 mg/l, pH 6,9 – 7,1, conductividad 4000  $\mu\Omega\text{-1}/\text{cm}$ , cloruros 1238 mg/l.

La eliminación de los sólidos suspendidos totales fue ligera a tiempos cortos y con intensidades de corrientes bajas (0,05 y 0,1 A). Con las mismas intensidades de corriente pero con 50 minutos de tiempo de contacto la eficiencia fue por encima del 78%. Mientras que para intensidades de corriente 0,4 a 0,8 A, ha obtenido altas eficiencias de eliminación como 92,1% y 95,4% respectivamente a los 5 minutos de tiempo de contacto.

La eliminación de los sólidos suspendidos totales es función de la cantidad de hierro generado. Ha encontrado que según se incrementa la cantidad de hierro en la solución se incrementa también la eficiencia de eliminación, alcanzando una eficiencia del 82% a 0,2 A con 5 minutos de tiempo de contacto y 14,5 mg/l de hierro generado. Cuando aumentó la cantidad de hierro a 28,9 mg/l la eficiencia también aumentó a 88% y 92% para intensidades de corriente de 0,2 y 0,4 A respectivamente.

El investigador sostiene que el agua residual usada tiene altas concentraciones de iones cloruros, en el proceso de electrocoagulación a través de la oxidación anódica convierte al ión cloruro en cloro gas [Bukhari et al., 1999] y el cloro oxida al ión ferroso a ión férrico insoluble. Los resultados obtenidos a 0,2 A, 0,4 A y 0,8 A, sugieren que el mecanismo dominante de eliminación de las partículas es por barrido de floculación – coagulación.

En relación a la eliminación de la turbidez en función del tiempo de contacto para los rangos de corrientes antes mencionados, los mejores resultados obtuvieron a 0,8 A, con una reducción de la turbidez de 51 NTU a 3,4 NTU con 5 minutos de contacto, cuando se incrementó el tiempo de contacto por encima de 5 minutos la turbidez residual se incrementó ligeramente. Y que la eliminación de la turbidez en función de la cantidad de hierro, ha encontrado que es similar a los sólidos en suspensión.

En relación a la eliminación de la DBO particulada fue alrededor del 99% a corrientes de 0,8 A y con 5 minutos de tiempo de contacto.

## **2.4. En relación con el cuarto objetivo. “Eficacia de la electrocoagulación en la eliminación la DQO y absorción UV”**

**Moreno-Casillas H., Cocke D., Gómez J., Morkovsky P., Parga J., Peterson E. (2007), “Electrocoagulation mechanism for CDO removal”. Separation and purification Technology 56, pp 204 – 211**

Los autores han realizado una investigación sobre el mecanismo de eliminación de la DQO por electrocoagulación. Para ello han utilizado una unidad de electrocoagulación a nivel de laboratorio de la empresa KASELCO Co. Utilizaron un rectificador de corriente de capacidad de 50 V y 10 A. El ajuste del caudal de alimentación lo hacían con una bomba peristáltica. Midieron el pH y la conductividad durante el experimento.

Sostienen que la eficiencia de eliminación de compuestos orgánicos puede variar de 0% a 100%. Mientras que la eliminación de la DQO puede variar de 0,5 a 86,4% con una desviación estándar de 27,30.

Los electrodos utilizados fueron de hierro y de forma cilíndrica apoyado sobre una base de PVC y cubierto con un cilindro transparente graduado lleno de agua para observar el desplazamiento del agua por algún gas generado.

La solución electrolítica utilizada tenía 170 ppm de ZnCl<sub>2</sub> y 1000 ppm de NaCl para incrementar la conductividad. El experimento se llevó a cabo a pH 5,2 y subió hasta 10,74.

### **Discusión de los resultados**

Presentan los siguientes casos de los mecanismos de eliminación de la DQO:

Caso I: Cuando la DQO se incrementaba

La DQO se incrementó cuando los compuestos (usualmente ácidos) reaccionaban con el Fe(II) para formar productos solubles y permanecían en la solución. Éste incremento fue más pronunciado en el caso de compuestos secuestrantes o complejantes como el EDTA, ya que éstos reaccionan principalmente con el Fe(II) y se incrementa el pH. Observaron que en el experimento el pH llegó hasta 10,24. Los investigadores concluyen que la DQO puede incrementarse debido a la fuerte oxidación de Fe(II) a Fe(III).

Caso II: cuando la DQO no era eliminada

Los investigadores sostienen que no todos los compuestos solubles y miscibles reaccionan con el Fe(II) y/o Fe(III), por lo cual, los que no fueron eliminados por electrocoagulación permanecieron en la solución. Como fue el caso de la glucosa, lactosa, alcohol isopropílico, fenol, sacarosa y compuestos similares. Una pequeña cantidad pudieron ser adsorbidas o absorbidas en los flóculos y consecuentemente fueron eliminadas accidentalmente.

Caso III: cuando la DQO fue parcialmente eliminada

Los autores dicen que el oxalato de sodio y sales orgánicas similares son parte de otro caso. En el proceso de electrocoagulación se generan iones de Fe que se hidrolizan a la forma de Fe(OH)<sub>2</sub> y Fe(OH)<sub>3</sub>, los iones de Fe(II) y Fe(III) forman con las sales hidróxidos insolubles de hierro, así, solo un bajo porcentaje de acetato y iones similares fueron eliminados. Los ácidos cítricos, salicílicos, tartáricos y oxálicos, que tienden a reaccionar con el Fe(II) y forman compuestos insolubles, mientras que con el Fe(III) forman compuestos solubles. Por otro lado, en el extremo opuesto de la celda otros compuestos pueden formar con el Fe(II) compuestos solubles y con el Fe(III) compuestos insolubles. Todos ellos serán parcialmente eliminados y la eficiencia de eliminación de la DQO dependerá del pH final.

Caso IV: Cuando la eliminación de la DQO fue alta

Los investigadores han podido comprobar que, cuando los compuestos que reaccionan con el Fe(II) y el Fe(III) forman compuestos insolubles, éstos se eliminan completamente. Los sólidos y líquidos suspendidos en pequeñas cantidades, así como coliformes fecales, turbidez, aceites y grasas, leche, sólidos suspendidos totales, no son un problema para el proceso de

electrocoagulación y son fácilmente eliminados. La porción de la DQO no eliminada será la porción soluble.

Además sostienen que los electrodos de aluminio muestran alta eficacia en la eliminación de la DQO a valores de pH bajo [Pichard T., et al. (2000); Cañizares P., et al. (2005)], debido al único estado de oxidación del Al, así al reaccionar con compuestos orgánicos forman compuestos insolubles. La solubilidad del  $Al(OH)_3$  a pH 4 es mínima.

**Kumar M., et al., (2009), "Treatment of bio-digester effluent by electrocoagulation using iron electrodes.**

Los investigadores en el presente artículo tratan de la reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) de un efluente de un biodigestor mediante el sistema de electrocoagulación por lotes a escala de laboratorio, usando electrodos de hierro con un área efectiva de 112 cm<sup>2</sup> y de 1 a 3 cm de separación entre electrodos. Han estudiado los efectos de varios parámetros como a densidad de corriente, pH, distancia entre electrodos, y tiempo de electrólisis, sobre la eficiencia de eliminación de la DQO.

Los resultados de los datos obtenidos de los parámetros antes indicados fueron analizados utilizando la técnica estadística ANOVA. El resultado de ANOVA para la eliminación de la DQO por electrocoagulación con electrodos de Fe muestra un valor de  $F = 9.55$ , un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de un valor de 0,9114 y un ajuste de  $R^2$  de 0,8159, que es alto y aboga por una alta correlación entre los valores observados y previstos. La probabilidad  $p$  ( $\sim 0,0001$ ) es inferior a 0,05. Esto indica que los términos del modelo son significativos en el 95% de nivel de probabilidad. Cualquier factor o interacción de factores con  $p < 0,05$  es significativo.

Finalmente la máxima eficiencia de eliminación de la DQO y el color fue de  $50,5 \pm 1,2\%$  y  $95,2\%$  respectivamente. Estos valores fueron observados con un óptimo de los parámetros de procesos como: densidad de corriente de 44,65 A/m<sup>2</sup>, pH 8, distancia entre electrodos 2 cm, tiempo de electrólisis de 120 minutos.

**Tezcan Ü., et al., (2006) "Electrocoagulation of olive mill wastewater",**

Los autores han realizado una investigación sobre la eliminación de la demanda química de oxígeno (DQO) de las aguas residuales de molino de oliva, así como aceites y grasas, y turbidez, en presencia de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y policloruro de aluminio (PCA) como coagulante de ayuda en un proceso electroquímico, utilizando ya sea electrodos de sacrificio de hierro o de aluminio. Además han investigado los efectos de la densidad de corriente; el material y la polarización de los electrodos; la cantidad de peróxido de hidrógeno utilizado como agente oxidante; la adición de coagulante de ayuda; el porcentaje de eliminación y el consumo de energía.

Para dicha investigación han utilizado un reactor electroquímico cilíndrico, de 10 cm de altura y un diámetro interior de 10 cm. El reactor estuvo cubierto con chaqueta de enfriamiento. La mayoría de los experimentos fueron realizados en un reactor de hierro con un agitador de hierro. Para determinar el efecto del material del electrodo han utilizado un reactor de aluminio con agitador de aluminio.

De acuerdo a los resultados experimentales obtenidos, han determinado que el electrodo de Fe fue mejor que el de Al, debido a la mejor eficiencia y al menor consumo de energía. La eficiencia de remoción de DQO fue del rango de 62-86%, mientras que la eliminación de grasas y aceites y de la turbidez fue del 100%, con una densidad de corriente entre 20-75 mA cm<sup>-2</sup> dependiendo de la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y coagulante de ayuda.

La eficiencia de tratamiento, en términos de reducción y consumo de energía, quedaba afectada por las condiciones de explotación empleadas. Dado que la densidad de corriente fue la variable operacional más importante, la óptima densidad de corriente fue determinada en función de la calidad del efluente, además dicen que, el consumo de energía depende de la zona geográfica así como la situación económica donde se aplica la electrocoagulación.

Han concluido que la electrocoagulación en ausencia de coagulante y oxidante no es demasiado eficaz en el tratamiento de este tipo de aguas residuales. La polaridad de los electrodos desempeñó un papel importante en el tratamiento de aguas residuales de la molienda de aceitunas.



Costo de la energía para la electrocoagulación aplicado al estudio estuvo en el rango de 0.18-6.75 € kg<sup>-1</sup> de DQO eliminado.

**Sanchez C. L., et al., (2003), "An electrocoagulation unit for the purification of soluble oil waste of high COD".**

Los investigadores han realizado un estudio sobre la purificación residuos de aceite soluble con alta DQO, para ello, inicialmente usaron una unidad de electrocoagulación a nivel de laboratorio, usando electrodos de aluminio de 10 cm de largo x 5 cm de ancho, y 1,2 cm espesor, los electrodos fueron colocados en una celda de metacrilato de metilo y el espacio entre electrodos fueron variados entre 5 y 15 mm. Han observado el incremento de la temperatura y que era proporcional a la potencia eléctrica consumida.

El caudal del agua residual a ser tratada fue de 2 l/h, con un flujo de recirculación de 6 l/h.

#### **Efecto de la concentración de NaCl**

Adicionaron NaCl para incrementar la conductividad del agua residual a un nivel adecuado. Han observado que la potencia consumida era directamente proporcional al voltaje de la celda y se incrementaba con la resistividad del fluido. Una concentración excesiva de NaCl fue utilizada para determinar la eficiencia del proceso. Para un agua residual conteniendo aceite soluble la eficiencia en la eliminación de la DQO decreció de 43,7% (para una concentración de NaCl de 0,015 mol/l (0,9 g/l)) a 32,3 % (para una concentración de NaCl de 0,045 mol/ (2,7 g/l)). Con respecto a la eliminación de los SS decreció 31,6% a 23,8%. Un exceso de NaCl lleva a un exceso de consumo del electrodo de aluminio a causa de una disolución irregular, como lo han podido observar por las ranuras del electrodo envejecido, con asperezas que alcanzaban 1mm. Además a concentraciones de cloruro por encima de 3 g/l, excede de la concentración máxima tolerada en aguas para reutilización futura.

#### **Influencia de la corriente y dosis del coagulante**

Para esta prueba los investigadores probaron con varias mezclas de residuos aceitosos, manteniendo las condiciones de operación, como: separación entre electrodos, conductividad

del líquido, y velocidad de flujo. La corriente fue variado de 2 a 10 A, correspondiente a una densidad de corriente de 400 – 2000 A/m<sup>2</sup> y a un voltaje de 4 a 15 V. La concentración teórica del aluminio fue calculada usando la corriente aplicada y la Ley de Faraday. Observaron que la eficiencia del tratamiento variaba significativamente de un residuo a otro, así la eficiencia de eliminación de la DQO y SS se incrementó con la corriente pasada y la concentración del coagulante.

Un incremento en la dosis del coagulante, causada por una gran corriente, da como resultado una disminución del potencial Z de la materia suspendida y un incremento de la tendencia de aglomeración partículas/gotitas. Cada residuo tiene una dosis límite de coagulante, por encima del cual la eficiencia de la electrocoagulación no se incrementa. Así mismo, alta corriente da como resultado alta fracción de gases, el cual favorece la coalescencia de las burbujas electrogeneradas y reduce la eficiencia de la electrocoagulación. En suma, la estructura de los residuos líquidos se cambia a una estructura de gel coloidal de alta estabilidad para concentraciones de Al superiores a 2,5 g/l.

#### **Influencia de la velocidad de flujo del líquido y la concentración de aluminio**

La velocidad de flujo fue estudiada a una intensidad de corriente constante de 7 A, con una cantidad de aluminio disuelto y un consumo de energía específica. La tasa de recirculación la han mantenido constante, permitiendo que la temperatura del fluido permanezca a un nivel aceptable para todo el experimento.

Una velocidad de flujo mayor que 3 l/h la eficacia decreció en función de la velocidad del residuo, esto se explica por la baja cantidad de aluminio disuelto, el cual está relacionado a la corriente efectiva y a la velocidad de flujo fijado. Los datos obtenidos, lo han utilizado para determinar la capacidad óptima de la unidad para un consumo determinado de electricidad.

#### **Influencia de la tasa de recirculación**

Debido al efecto Joule, la temperatura del líquido puede incrementarse debido a la baja velocidad del flujo en la celda y un consumo excesivo de energía. Los experimentos fueron llevados a cabo a flujo constante de 2 l/h y una corriente de 7 A y variando la tasa de

recirculación entre 0,5; 0,75; y 0,9. La máxima eliminación de la DQO se observó a la tasa de recirculación de 0,75, mientras que la eliminación de los SS fueron ligeramente reducidos a altas tasas de recirculación.

Un incremento en la tasa de recirculación se acompaña por alta velocidad en la celda y tiempos de residencia cortos. Sin embargo, el tiempo de residencia global de los residuos en el proceso de tratamiento no se ha modificado, y el consumo específico de energía permanece constante. Además sostienen que altas velocidades favorecen la disolución del Al por corrosión química. Como conclusión dicen que la tasa de recirculación tuvo que ser 0,5 o mayor.

### **Influencia de la separación entre electrodos**

Para identificar las influencias, los investigadores han realizado los experimentos usando separaciones de 5, 10, 20 mm. Y han observado que la eliminación de la DQO decrece en función de la separación de los electrodos, mientras que la eficiencia en la eliminación de los SS aumenta ligeramente.

### **Conclusiones**

A partir de los datos a nivel laboratorio, han diseñado una planta piloto rectangular de PVC con electrodos de aluminio, para ello han usado 16 placas de 285 mm de largo x 155 mm de alto y 12 mm de grosor. La corriente aplicada varió hasta 32 A, con una variación de aluminio disuelto de 0,5 a 1,5 g/l. Los resultados obtenidos fueron muy buenos con una reducción de la DQO de 79,7%; mientras que a nivel laboratorio fue de 66,1%, bajo condiciones similares de operación.

De los datos de ambas experiencias a nivel laboratorio y piloto, sirvió para el diseño a escala industrial. Dicha planta trató una mezcla de aceites solubles con una DQO de 230.000 mg/l y SS de 12.000 mg/l. El caudal tratado fue de 5000 m<sup>3</sup>/año. La eficiencia que han alcanzado fue de 94% para la DQO.

**Merzouk B., et al., (2009), "Studies on the decolorization of textile dye wastewater by continuous electrocoagulation process".**

Los investigadores han realizado una investigación sobre el tratamiento de aguas residuales de tintura procedentes de la industria textil por electrocoagulación, donde analizaron la eliminación de la DQO y el color. Para ello, han utilizado un reactor rectangular de 8,6 litros dividido en dos compartimentos, el primero tenía un volumen de 3,1 litros con 2 electrodos de aluminio de forma rectangular (240 mm x 20 mm x 1 mm), con una superficie activa de 48 cm<sup>2</sup>, la distancia entre electrodos era de 1 cm. El caudal tratado era entre 25 y 78 l/h. El agua de primer compartimento pasaba al segundo por rebose y el volumen del segundo compartimento era de 5,5 L, los lodos eran recogidos esencialmente por flotación. La densidad de corriente varió entre 20,8 a 62,5 mA/cm<sup>2</sup> que se corresponde a intensidades de corriente entre 1 y 3 A. Todos los experimentos se realizaron a temperatura ambiente.

El agua residual utilizada fue sintética, preparado a partir de compuestos orgánicos no iónicos insolubles, que normalmente se utiliza en la industria textil. La concentración de la DQO en el agua de entrada era de 2500 mg/l, el pH ha variado entre 3,1 y 9,1 ajustando con 0,1M de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ó NaOH.

Han realizado un estudio sobre el efecto de la densidad de corriente sobre la eficiencia de eliminación del color. Para ello han trabajado con varias densidades de corriente manteniendo fijo la concentración del color en el agua de entrada con valores de pH entre 7,7 y 8,0 y un caudal de 25,2 l/h, el tiempo de proceso fue hasta 32 minutos. Observaron que al aumentar la densidad de corriente disminuye el tiempo en alcanzar la mayor eficacia de eliminación del color, pero aumenta la cantidad de lodo, el consumo de electrodo, y el consumo de energía aumenta como el cuadrado de la densidad de corriente ( $j^2$ ) e induce calor por efecto Joule. De sus experiencias realizadas han encontrado que la densidad óptima estuvo entre 30 a 40 mA/cm<sup>2</sup> para una eliminación mínima aceptable del color del 80%. Para las demás experiencias han considerado una densidad de corriente de 31,25 mA/cm<sup>2</sup> el cual corresponde a intensidad de corriente de 1,5 A, y un consumo de energía bajo.

Efecto del pH del influente sobre la eficacia de eliminación del color. Para observar éste efecto han ajustado el pH del agua residual entre 3,16 y 9,0. A pH 3,16 obtuvieron una eliminación

pobre del color, aumentando el pH a 4,1 a 9,0 han alcanzado una eficacia de eliminación del color en un 80 a 90%. La máxima eficacia estuvo entre pH 6,15 – 9,0.

El efecto del pH lo han explicado de acuerdo a la siguiente reacción:

Ánodo:  $\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3 \text{e}^-$

Cátodo:  $2\text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 (\text{g}) + 2 \text{OH}^-$

A pH bajos 2-3 predominan especies monoméricas  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ . Cuando el pH está comprendido entre 4 y 9 se generan iones  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{OH}^-$  y forman varias especies monoméricas  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$ , y especies poliméricas como  $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$ ,  $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$ ,  $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$  que finalmente se transforma en  $\text{Al}(\text{OH})_3$  sólido insoluble. Cuando el pH es mayor que 10 la concentración del anión monomérico  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  aumenta a expensas del  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Así mismo el cátodo puede ser atacado químicamente por los iones  $\text{OH}^-$  y junto con el  $\text{H}_2$  elevan el pH.

Han considerado que son 2 los mecanismos que intervienen en la eliminación de la contaminación: (1) La precipitación que ocurre a pH por debajo de 4, y (2) la adsorción que ocurre a pH altos. Los investigadores han ajustado el pH a 6,1 como un óptimo para la eliminación del color.

Efecto del proceso de electrocoagulación sobre la DQO del influente. La DQO del agua residual fue de 2500 mg/l, con pH de 4,5 y 8,15, tiempo de residencia de 14 minutos, densidad de corriente de 31,25 mA/cm<sup>2</sup>, conductividad 2,4mS/cm y distancia entre electrodos de 1 cm. A estas condiciones, han alcanzado una eficacia de eliminación de la DQO en más del 80%.

**Linares–Hernandez I., et al., (2009), “Influence of the anodic material on electrocoagulation performance”**

Los investigadores han estudiado la influencia del material de ánodo sobre en la electrocoagulación, utilizando agua residual procedentes del decantador primario y han evaluado los parámetros como la DQO, DBO<sub>5</sub>, turbidez, color, coliformes totales, lodos y Fe y Al.

Utilizaron 3 reactores electroquímicos discontinuos diferentes, con placas de aluminio, hierro y aluminio + hierro. Los reactores Al y Fe eran similares de 10 placas paralelas, cada electrodo

tiene unas dimensiones de 0,11 cm de largo x 0,06 cm de ancho, dando un área de electrodo de 0,132 m<sup>2</sup> y área total anódica de 0,066 m<sup>2</sup>. El volumen del reactor era de 4 dm<sup>3</sup>, la fuente de alimentación era de 8 V y de 1-4 A, correspondiendo una densidad de corriente de 15,15 a 60,60 A/m<sup>2</sup>. Para el reactor con ánodos de aluminio y hierro, tienen 12 electros, 6 de Fe y 6 de Al, las dimensiones son las mismas que las anteriores, la superficie total anódica es de 0,0792 m<sup>2</sup>, la fuente de alimentación fue 13 V y de 1 – 4 A, las densidades de corriente eran de 12,62 a 50,5 A/m<sup>2</sup>.

El agua residual que alimentó al reactor con placas de aluminio fue ajustado el pH con NaOH ó H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> con una intensidad de corriente de 3 A y 60 minutos de tiempo de tratamiento. Han encontrado que la máxima reducción de la DQO (46 – 50%) ocurrió al pH comprendido entre 6 y 8. Sostienen que la eliminación de la DQO en el rango de pH entre 4 y 8 no es significativa. En relación con la densidad de corriente en función de la eliminación de la DQO, han encontrado que la mejor eficacia fue a 45,45 A/m<sup>2</sup> (50%), al aumentar la densidad de corriente la eliminación no fue significativa (50,6%). En cuanto a la eliminación coliformes, han obtenido un 99% de eliminación, el color se redujo en un 85%, la turbidez un 83%.

Con placas de hierro, el agua residual fue ajustado a pH 2 – 12, han visto que a pH 8 obtienen la máxima reducción de la DQO (53%), y a pH 12 la más baja. Al mismo tiempo para cada pH han tomado otras muestras y han ajustado el pH final a 9,5, para la muestra trabajada a pH 8 han obtenido una reducción de la DQO en un 70% a los 60 minutos de tratamiento. En cuanto a la variación de la densidad de corriente en función de la eliminación de la DQO, han encontrado que la mayor eliminación de la DQO (70%) fue por debajo de los 45,45 A/m<sup>2</sup>, y no fue significativo aumentando la densidad de corriente a 60,6 A/m<sup>2</sup> un 73% de la DQO. En relación a los coliformes totales se dedujeron en un 99%, color 81%, turbidez un 80%.

Con placas de hierro + aluminio, el rango de pH inicial del agua residual fueron los mismos que los anteriores experimentos. Han encontrado que trabajando con el agua inicial de pH 8 alcanzan la máxima eliminación de la DQO (50%), y si ajustan el pH del agua a 9,5 obtienen una reducción de la DQO del 69%. En relación a densidad de corriente en función con la eliminación de la DQO, encontraron que la óptima reducción conseguida es a 37,87 A/m<sup>2</sup> un 69% de eliminación, y aumentando la densidad de corriente la eliminación no es significativa. En cuanto a la eliminación de coliformes han obtenido un 99% de reducción, un 83% de reducción del color y la turbidez un 80%.

**Yetilmezsoy K., et al., (2009), “Decolorization and COD reduction of UASB pretreated poultry manure wastewater by electrocoagulation process: A post-treatment study”.**

Los investigadores han realizado un estudio de post-tratamiento por electrocoagulación de un agua residual pretratada, proveniente de una granja de aves de corral. Analizaron los efectos de los parámetros de funcionamiento tales como tipo de material de electrodo de sacrificio, el tiempo de electrólisis, la densidad de corriente, pH inicial, y la concentración de electrolito con el fin de optimizar las condiciones para el post-tratamiento de las aguas residuales del reactor anaerobio (UASB). Las pruebas preliminares realizadas con dos tipos de electrodos de sacrificio (Al y Fe), han encontrado que la eficacia en la eliminación de la DQO y reducción del color con electrodos de Al fue mayor que con electrodos de Fe. Ensayos posteriores realizados con electrodos de Al demostraron que las condiciones de funcionamiento óptimo estaban a un pH inicial de 5,0, una densidad de corriente de 15mA/cm<sup>2</sup>, y un tiempo de electrólisis de 20 min. Los resultados indicaron que, en virtud de las condiciones óptimas, alrededor del 90% de DQO y 92% del color residual podría ser eliminado de forma efectiva a partir de los efluentes del reactor biológico (UASB) con la contribución adicional de la tecnología de electrocoagulación utilizada como una unidad de post-tratamiento.

Por consiguiente, la electrocoagulación puede considerarse como una alternativa a las técnicas existentes o que se apliquen como post-tratamiento después de un paso en el proceso biológico para mejorar la calidad de la descarga final en términos de la DQO residual y eliminación del color.

**Thakur Ch., et al., (2009) “Electrochemical treatment of a distillery wastewater: Parametric and residue disposal study”.**

En el presente estudio los investigadores reportan los datos obtenidos sobre la eliminación de la DQO y el color mediante electrocoagulación de aguas residuales provenientes de un biodigestor, para ello han utilizado un reactor discontinuo con electrodos de acero inoxidable tipo placa de 1,5 litros de capacidad.

Han desarrollado un diseño compuesto central basado en la metodología de superficie de respuesta con el fin de evaluar los efectos interactivos de los cuatro parámetros independientes, como son el pH inicial, (pH0: 3,5 – 9,5), densidad de corriente (j: 39,06 –

195,31 A/m<sup>2</sup>), distancia entre electrodos (g: 1 – 2 cm), tiempo de electrólisis (t: 30 – 150 minutos), sobre la eficiencia de eliminación de la DQO y el color.

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) mostraron que la densidad de corriente, tiempo y pH son factores que afectan significativamente la eliminación de la DQO por electrocoagulación, mientras que la separación entre electrodos no afectó significativamente a la eficiencia de eliminación de la DQO y el color.

Los valores de condiciones óptimos de los parámetros examinados mediante la metodología de superficie de respuesta han sido: pH = 6,5, densidad de corriente  $j = 146,75 \text{ A/m}^2$ , separación entre electrodos  $g = 1 \text{ cm}$  y tiempo = 130 minutos. A estos valores la máxima eliminación de la DQO fue de 63,1 % y del color fue de 98,4%.

**Zongo I., et al., (2009), “Electrocoagulation for the treatment of textile wastewaters with Al or Fe electrodes: Compared variations of COD levels, turbidity and absorbance”.**

Los autores han investigado la eficiencia de la técnica de electrocoagulación discontinua en el tratamiento de aguas residuales textiles, con especial atención a la comparación de las variaciones de los niveles de DQO, turbidez y absorbancia. Así mismo han realizado una comparación de la eficacia de los electrodos de Fe y Al. Para ello han utilizado una celda electroquímica de polimetacrilato de metilo de placas paralelas de Fe o Al de 70mm × 150mm y de 2 litros de capacidad. La experimentación fue con recirculación del líquido en el circuito, mediante una bomba peristáltica con un caudal del líquido de 2,5 cm<sup>3</sup>/s. La densidad de corriente estuvo en el rango 50-200 A/m<sup>2</sup>.

Las aguas residuales fueron tomadas: uno directamente del conducto dentro de la planta textil, y la segunda de la estación local de aguas residuales.

Para el tratamiento con electrodos de Al, el pH de las muestras fue ajustado a 6,5 para la óptima precipitación de hidróxidos de Al. Mientras que cuando han trabajado con electrodos de hierro no han variado el pH inicial del agua residual.

Los autores han interpretado los datos experimentales mediante un modelo simple involucrando en la ecuación general de equilibrio el metal disuelto en forma de hidróxidos y la



sustancia contaminante. Observaron que los niveles de DQO y de absorbancia se iban reduciendo a lo largo de la experimentación hasta su límite final para altas cantidades de coagulante. Para estos dos parámetros consideran que el modelo fue consistente y satisfactorio a lo largo de la experimentación. Por el contrario la disminución de la turbidez obedece a otra ley, ya que su eliminación fue muy rápida y totalmente eliminada a concentraciones de ión metálico por encima de 200 mg/l para ambos coagulantes investigados.

Concluyen que la DQO no puede ser eliminada totalmente por electrocoagulación, y parece ser que este tratamiento tiene su máxima eficiencia para concentraciones de iones metálicos por encima de 500 ppm para aluminio y 700 ppm para hierro. Según sus investigaciones sostienen que la DQO remanente no depende de la naturaleza de los electrodos sino del origen de los residuos, así, la eliminación de la DQO del agua residual de la estación fue de un 88% con ambos electrodos y la eliminación de la DQO de la planta textil fue de un 74% con electrodos de hierro y un 78% con electrodos de aluminio. Respecto a la absorbancia, a 436 nm observaron una reducción del aspecto coloreado y que el nivel de la absorbancia tendía a cero por la cantidad de metal disuelto mayor que los indicados anteriormente.

En relación al consumo de energía, el gasto de energía para el tratamiento de 1000 ppm de DQO fue estimado en 1,75 kWh/m<sup>3</sup> para electrodos de hierro y 1,53 kWh/m<sup>3</sup> para electrodos de aluminio. Sostienen que estos valores pueden reducirse en un 30% por el incremento de la conductividad, adicionando 1 g/l de NaCl llegando a ser un costo moderado y un impacto al medioambiente aceptado.

**Kabdash I., et al., (2009), "Effect of dye auxiliaries on color and COD removal from simulated reactive dye bath effluent by electrocoagulation".**

Los investigadores han estudiado la eliminación del color y DQO de aguas residuales de baño de tinte mediante electrocoagulación, usando electrodos de acero inoxidable y aluminio. Para ello han usado una celda de polietileno con 6 placas monopolares conectadas en forma paralela con un área efectiva de 38,5 cm<sup>2</sup> (L = 11,9 cm y d = 1,02 cm). La distancia entre electrodos fue de 3 mm, la densidad de corriente fue fijada a 22 mA/cm<sup>2</sup> (corriente aplicada de 5 A), el tiempo de tratamiento fue 30 minutos y el pH inicial de la muestra fue de 11,5.

Han observado que usando electrodos de acero inoxidable obtienen buenos resultados en la eliminación del color, mientras que con electrodos de aluminio la eliminación del color fue muy limitado (20%). En relación a la eliminación de la DQO, con acero inoxidable y aluminio la reducción de la DQO dependía del tipo de tinte, y adicionando NaCl mejoraba la eliminación hasta un 54% con electrodos de acero inoxidable y un 59% con electrodos de aluminio.

Sostienen que el mecanismo dominante de eliminación del color y la DQO de efluentes de baño de tinte por electrocoagulación fue mediante coagulación y adsorción en valores de pH por encima de 11.

**Zaied M., et al., (2009), "Electrocoagulation treatment of black liquor from paper industry"**

Los autores sostienen que la electrocoagulación es una técnica efectiva, rápida y económica para el tratamiento del licor negro procedente de la industria de papel. Han estudiado el efecto de la densidad de corriente, tiempo de electrólisis, tipo de material de electrodo y pH inicial, con un intento de lograr una alta capacidad de eliminación. Para ello han utilizado una celda electroquímica con una tapa especial soportando una serie de hojas paralelas de aluminio o hierro usados como electrodos de sacrificio, tres electrodos fueron conectados como ánodos y 3 como cátodos, la superficie activa fue de 50 cm<sup>2</sup> y el espacio entre electrodos fue de 5 mm.

Los resultados arrojados por los investigadores, han sido que para este tipo de efluentes con electrodos de aluminio se logran buena eliminación de la DQO (98%), del color (> 99%) y de polifenoles (92%), bajo las siguientes condiciones óptimas: pH inicial 7, t = 50 minutos, densidad de corriente  $j = 14 \text{ mA /cm}^2$ . El pH final del licor tratado fue cercano al neutro lo cual permite su descarga directamente a la corriente acuática.

## 2.5. En relación con el quinto objetivo. “Eficacia de la electrocoagulación en la reducción de aniones (nitratos y sulfatos)”

Barada Prasanna Dash, Sanjeev Chaudhari, (2005). *Electrochemical denitrification of simulated ground water*. *Water Research* (39) 4065-4072.

La desnitrificación de agua subterránea por procesos electroquímicos fue investigada con el objetivo de maximizar la transformación de nitrato a nitrógeno gas. Fueron escogidos como materiales de electrodos aluminio, grafito, hierro y titanio. Con electrodos de aluminio, de hierro y de titanio han obtenido una reducción de nitrato del 70 - 97 %, mientras que con electrodos de grafito la reducción fue solamente del 8 %. El nitrato fue transformado a amoníaco con electrodos de aluminio y hierro, pero con electrodos de titanio el nitrógeno fue aparentemente el producto final más importante.

La reducción del nitrato con electrodos de titanio fue retardada en presencia de iones cloruro posiblemente debido a la formación de iones de hipoclorito.

El estudio indica que el proceso podría ser apropiado para la desnitrificación del agua potable.

El agua sintética, que usaron, fue preparada variando las concentraciones de nitratos (100 -200 mg/l de NO<sub>3</sub>-N con una relación 1:1 NaNO<sub>3</sub> y KNO<sub>3</sub>), el pH de la solución fue de 8±0.2.

El prototipo usado incluía un rectificador de potencia (0-20V), amperímetro, voltímetro y una celda electroquímica. El rectificador fue usado para mantener una densidad de corriente constante, el pH se mantenía adicionando HCl o NaOH. La temperatura se mantuvo a 30°C ayudado por un baño de agua.

Para el estudio han seleccionado electrodos de aluminio, hierro, grafito y titanio. Han encontrado una eliminación del 8% de nitrato después de 9 horas empleando una densidad de corriente de 140 mA/cm<sup>2</sup> y 300 ml del volumen del líquido. Mientras que se eliminó hasta un 80% de nitrato después de 5 horas, utilizando electrodos de aluminio, hierro y titanio en

condiciones experimentales similares. La alta remoción con estos electrodos puede ser debido a la gran capacidad de donación de electrones. El grafito es un no metal y un pobre donador de electrones en comparación con los metales.

Los estudios cinéticos de cualquier proceso juegan un papel importante en la determinación del tiempo de retención de hidráulico en cualquier sistema de reactor para la eliminación deseada. La desaparición de nitrato en bajas concentraciones y baja densidad de corriente podrían seguir un modelo cinético de primer orden donde la velocidad de reacción es proporcional a la concentración de contaminante disuelto.

$$dC/dt = -k_{obs}[C],$$

Donde  $k_{obs}$  es el coeficiente de velocidad de primer orden observado (h-1), al integrar la ecuación resulta:

$$[C] = [C_0] e^{-kt},$$

Donde  $[C_0]$  es la concentración inicial del contaminante disuelto.  $k_{obs}$  fue calculado por una regresión lineal de  $\ln([C]/[C_0])$  vs tiempo, y la concentración  $[C_0]$  medida a  $t = 0$ , los valores de la coeficiente  $k$  se pueden observar en el presente trabajo.

Sostienen que es necesario una alta área superficial del hierro metálico para que el proceso de desnitrificación sea efectiva y algunas veces un periodo inicial de contacto es requerido a pH elevado [Alowitz M.J., et al. 2002]. Han observado que la eliminación electroquímica del nitrato con electrodo de hierro no está de acuerdo con reportes de otros investigadores sobre la reducción de nitrato por hierro metálico donde la reducción cesa casi en  $pH > 5$ . Pero el mismo efecto no fue observado durante el proceso electroquímico porque la transferencia de electrones no es afectado por el pH debido al potencial eléctrico aplicado.

Han observado que la constante de velocidad se incrementa a medida que aumenta la densidad de corriente. En donde la constante de velocidad se expresa con respecto a la carga (coulomb) que circula por unidad de volumen. La densidad de carga para ser un parámetro apropiado y considerado como un criterio de diseño. Aproximadamente 1 coulomb de carga

tiene que pasar por cada 0,005 mg de NO<sub>3</sub> eliminado, sin tener en cuenta los materiales de electrodos y las condiciones experimentales.

El costo preliminar estimado de la desnitrificación del agua subterránea, por el proceso electroquímico, se ha hecho considerando el costo de la energía y el costo de los electrodos. El costo de la energía eléctrica es variable en diferentes partes del mundo. Los investigadores han realizado el estudio económico en dólares americanos, considerando el precio de la energía eléctrica en kWh, y el costo de los materiales de los electrodos considerando los kilogramos de las hojas de aluminio, o hierro o de titanio.

Las conclusiones a que han llegado los investigadores son:

- El hierro y el aluminio mayormente transforma el nitrato a amoníaco, mientras que el titanio transforma el nitrato a nitrógeno.
- Fuertes condiciones de reducción (bajo potencial de oxidación-reducción) favorece la formación de amoníaco, mientras que la formación del nitrógeno y otros óxidos ocurre a bajas condiciones de reducción (alto potencial de oxidación-reducción).
- La transformación de nitrato a nitrógeno depende en gran parte del material del electrodo utilizado y la velocidad de transformación del nitrato es afectado insignificamente por el pH en el rango de 7 – 9.
- La eliminación electroquímica del nitrato, a las concentraciones estudiadas siguen la ecuación de velocidad de primer orden.

**Szpyrkowicz L., Daniele S., Radaelli, M., Specchia S. (2006). *Removal of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> from water by electrochemical reduction in different reactor configurations. Applied Catalysis B: Environmental, 66, 40-50.***

En este trabajo los autores muestran los procedimientos para reducir la concentración de nitratos en aguas por debajo de los límites de 15 y 50 mg/l.

Han investigado la composición de los electrodos más eficaz para la eliminación de nitratos.

En el trabajo muestran las reacciones de descomposición electrolítica de los nitratos en un equipo experimental con electrodos de diversas aleaciones a base de paladio-cobre y catalizadores Ti/Pd-Co.

Con electrodos de Ti/Pd-Co, con cobre, han conseguido rebajar la concentración de nitratos desde 200 a 50 mg/l.

**Irdemez S., et al., (2006), "Optimization of phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with aluminum plate electrodes".**

Los investigadores han utilizado el método Taguchi (Matriz ortogonal) para determinar las condiciones óptimas de la eliminación del fosfato de aguas residuales por electrocoagulación con electrodos de placas de aluminio.

Los autores sostienen que la matriz ortogonal de Taguchi se utiliza para obtener los mejores parámetros de diseño para un proceso óptimo con el menor número de experimentos. Y que en los últimos años, el método Taguchi se ha utilizado para determinar los parámetros óptimos debido a muchas ventajas [Nian C., et al., 1999]. Las principales ventajas de este método, frente a otros métodos estadísticos de diseño experimental, son los parámetros que afectan a un experimento.

El objetivo de los investigadores fue determinar las condiciones óptimas de operación. Los parámetros que han estudiado en la experimentación fue la concentración inicial de fosfato, el pH inicial de las aguas residuales, la concentración del soporte electrolítico, el tipo de electrolito y la densidad de corriente. Los rangos de los parámetros experimentales estuvieron entre 50 y 500 mg/l (como PO<sub>4</sub> - P) para la concentración inicial del fosfato, el pH inicial del agua residual fue de 4-7, la concentración del electrolito estuvo entre 0-10 mM de los siguientes tipos de electrolitos NaCl, NaNO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y CaCl<sub>2</sub> y la densidad de corriente utilizada estuvo entre 0.25-1.00 mA/cm<sup>2</sup>.

La unidad de electrocoagulación consistió en 6 pares de electrodos de placas de aluminio con un área total aproximada de 1500 cm<sup>2</sup> y el espacio entre electrodos fue de 5 mm. Los electrodos fueron conectados un alimentador de potencia digital en forma monopolar. La

unidad de electrocoagulación fue agitada a 1500 rpm con un agitador magnético. El volumen del reactor fue de 850 ml, operado por lotes. Se midieron el pH, la temperatura y la conductividad.

Para el análisis estadístico, las variables que han escogido los investigadores han sido el tipo y concentración del soporte electrolítico, densidad de corriente, concentración inicial del fosfato, y el pH inicial del agua residual.

Para un tiempo de reacción constante de 25 minutos, los autores han encontrado que las condiciones óptimas de los parámetros fueron: concentración inicial del fosfato de 50 mg/l, 4,5 mM de NaCl y 1,00 mA/cm<sup>2</sup>. A estas condiciones, encontraron que la eficiencia de eliminación pronosticada y experimental de fosfatos de las aguas residuales por electrocoagulación con electrodos de placa de aluminio fueron 99,9 y 100,0%, respectivamente.

Han utilizado un análisis estadístico de la varianza (ANOVA) para ver si los parámetros del proceso eran estadísticamente significativos o no. Además, según los resultados del test-F, han podido concluir que el grado de influencia de los parámetros del proceso en la eficiencia de eliminación del fosfato son: la concentración inicial de fosfato, la densidad de corriente y el pH inicial de la solución.

También sostienen que los fosfatos pueden ser eliminados completamente del agua mediante el uso de la electrocoagulación. Los precipitados son una mezcla de Al(OH)<sub>3</sub> y AlPO<sub>4</sub>, aunque la precipitación del AlPO<sub>4</sub> se manifestó por encima del Al(OH)<sub>3</sub>.

**Muruganathan M., et al., (2004), "Removal of sulfide, sulfate and sulfite ions by electro coagulation"**

Los investigadores han estudiado la eliminación de diversos tipos de azufre de las aguas residuales de la industria de curtidos y también de muestras sintéticas, mediante electroflotación. Han probado ánodos consumibles de hierro y aluminio, como ánodo insoluble el de titanio. Han encontrado que los ánodos de hierro y aluminio son eficaces para la eliminación de sólidos en suspensión, sulfuro, sulfato y sulfito.

Para ello usaron una celda de electro-flotación de 15 cm × 15 cm × 15 cm, fabricados en material perspex. El volumen efectivo de la celda fue de 3,0 l. Utilizaron electrodos de barras metálicas con un diámetro de 0,6 cm, el montaje del ánodo comprendía de seis barras, cada una con una longitud de 11 cm perpendicularmente conectado a una varilla. Los cátodos fueron ensamblados de forma similar. El conjunto comprendía de barras organizadas tanto de electrodos del ánodo y cátodo paralelas entre sí. La separación entre ánodo y cátodo se mantuvo en 2 mm para evitar cortocircuito y para reducir al mínimo las pérdidas óhmicas. La densidad de corriente aplicada fue de 47 mA/cm<sup>2</sup> constante durante todo el experimento. El tiempo de contacto varió entre 2 a 15 minutos.

La coagulación se consideró esencial y eficaz para la flotación de sólidos en suspensión. Los iones metálicos, generados in situ por anodización del ánodo, reaccionan con los iones de sulfuro disueltos. Los sulfuros metálicos así formados como suspensión coloidal fueron coagulados y flotados simultáneamente por las burbujas de hidrógeno generadas en el cátodo.

Han observado que simultáneamente ocurre la precipitación, coagulación y flotación durante el proceso de electro-flotación. Los análisis para determinar la naturaleza de los sulfuros formados durante la fase de precipitación electrolítica fueron por difracción de rayos X. Además, han estudiado el efecto del pH, la densidad de corriente y la concentración inicial de contaminantes. La eliminación de los iones sulfato y sulfito lo han explicado por mediciones del potencial zeta.

Los autores muestran las características de los efluentes crudos y tratados. Se observa que se han eliminado en torno al 90% de DBO y DQO mediante el uso de ánodos de hierro o de aluminio. En presencia de hierro como ánodo, han observado un precipitado de color negro típico de sulfuro de hierro que apareció poco después de que los electrodos se energizaran. Lo que explican que el sulfuro se convierte en sulfuro de hierro. También han observado que la eliminación de azufre sulfhídrico (~ 75%) fue ligeramente mejor con el uso de ánodo de Fe, y la eliminación de sólidos en suspensión (> 95%) fue superior en presencia de ánodos de Al. Mientras que con el ánodo de titanio han obtenido una disminución del 50% de azufre sulfhídrico y un aumento equivalente de sulfato de azufre, esto lo explican por la oxidación de S<sup>2-</sup> a SO<sub>4</sub><sup>-</sup> [Rajalo y Petrovskaya,1996].



**Efecto de la concentración inicial de los contaminantes sobre la recuperación**

Para observar el efecto de recuperación han realizado ensayos con soluciones sintéticas preparadas a partir de sales de sodio puro como de sulfuro, sulfato y sulfito. Preparado a diferentes concentraciones iniciales. Para ello han utilizado electrodos hierro como ánodo. Los resultados indican que la eliminación de las especies de azufre disminuye al aumentar la concentración. La eliminación del sulfuro de fue mucho mayor y casi completa a bajas concentraciones (100 mg / l) en comparación con sulfito y sulfato. El azufre sulfhídrico ( $S^{2-}$ , SH) fue eliminado en forma de metal como precipitado insoluble de sulfuro de hierro o de aluminio dependiendo del ánodo.

**Efecto de la densidad de corriente en la eliminación de especies de azufre**

Los investigadores realizaron también pruebas a distintas densidades de corriente. Y concluyen que evidentemente, al aumentar la densidad de corriente de 12 a 62 mA/cm<sup>2</sup>, la eliminación de las especies de azufre también aumenta. Los iones de  $S^{2-}$  pueden ser eliminados hasta el 90%, mientras que a bajas densidades de corriente la eliminación de los iones sulfato y sulfito ha sido comparativamente pobre. Al aumentar la densidad de corriente, aumenta el flujo de burbuja y, a su vez, la probabilidad de colisión. Al mismo tiempo, ocurre la disolución del ánodo y, la concentración de iones metálicos también aumenta. A las densidades más altas el consumo de electrodos es elevado. Así, la densidad de corriente desempeña un papel importante en el logro de resultados óptimos.

**Efecto del pH en la eliminación del sulfato**

Han encontrado que la eliminación del sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) fue ligeramente mejor en condiciones ácidas, tanto, usando electrodos de aluminio y hierro. Para pH por encima de 10 la eliminación fue pobre con ambos electrodos.

**Phutdhawong W., et al., (2000), Electrocoagulation and subsequent recovery of phenolic compounds, Analytical Sciences vol. 16. The Japan Society for Analytical Chemistry**

Los autores han realizado una investigación sobre electrocoagulación de compuestos fenólicos y su recuperación. Para ello, han usado 2 placas de aluminio de 30 x 10 x 0,05 cm como electrodos. Dichos electrodos fueron sumergidos en un vaso de 11 cm de diámetro y 23 de altura conteniendo un litro de una solución de compuestos fenólicos al 0,1% p/v y como electrolito han usado 2 g de cloruro de sodio. La separación entre electrodos era de 3 cm, con una intensidad de corriente de 0,5A y 20V, con un intervalo de cada 15 minutos de electrolisis por un periodo de 2 horas.

Los investigadores sostienen que el aluminio liberado del ánodo ha interactuado directamente con un anión o un fenol el cual ha precipitado como trifenolato de aluminio  $[Al(OAr)_3]$  y que el método puede aplicarse para algunos compuestos fenólicos tales como n-propil 3,4,5 trihidroxibenzoato, y tanino, que fueron eliminados en un 94%. Además los compuestos precipitados pueden recuperarse por un método simple.

## **2.6. En relación con el sexto objetivo. “Eficacia de la electrocoagulación en la eliminación de cationes”**

**Mouedhen G., et al., (2008), “Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process”.**

Los autores han estudiado el comportamiento de los electrodos de aluminio en el proceso de electrocoagulación, examinando de manera sistemática la polarización de los electrodos, evolución del pH durante la electrólisis, cantidad de aluminio liberada como coagulante.

En resumen han encontrado que la concentración mínima de electrolito  $Cl_2^-$  requerida para la ruptura de la capa pasiva del ánodo fue de 60 ppm, y que ésta cantidad reduce considerablemente el voltaje en la celda durante la electrólisis. En relación con la cantidad global de coagulante  $Al^{3+}$  generada tiene 2 orígenes: por oxidación electroquímica del ánodo y por ataque químico del cátodo. El medio electrolítico actúa como un neutralizador del pH en la electrólisis con electrodos de aluminio.

Concluyen que la eficiencia alcanzada en la eliminación de  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  y  $\text{Zn}^{2+}$  ha sido por encima del 98%, con un tiempo de electrocoagulación de 75 minutos, densidad de carga de 0,5 A/dm<sup>2</sup>, distancia entre electrodos de  $d = 4$  cm.

**Escobar C., Soto-Salazar C., Toral M., (2004) *Optimization of the electrocoagulation process for the removal of copper, lead, and cadmium at natural waters and simulated wastewater. Journal of Environmental Management.***

Los investigadores han usado como celda electroquímica un vaso de precipitado, en donde han introducido 2 placas de acero laminado de área geométrica de 54 cm<sup>2</sup> y 0,8 mm de espesor, la densidad de corriente fue de 36 A/m<sup>2</sup> por 10 minutos.

Para funcionamiento en continuo usaron un canal colector con 2 placas rectangulares de acero laminado con un área geométrica de 14 cm<sup>2</sup> y de 0,8 mm de espesor, la solución de agua residual sintética contenía 12 mg dm<sup>-3</sup> de cobre, 4 mg dm<sup>-3</sup> de plomo; y 4 mg dm<sup>-3</sup> de cadmio y fue la misma para todos los experimentos. En esta etapa la muestra a analizar se tomaba a la salida de la celda, luego fue centrifugada y analizada.

El estudio para la evaluación de la influencia del pH, lo han realizado manteniendo el pH entre 4 y 9, el caudal de agua a tratar estuvo entre 6,3 y 17 cm<sup>3</sup>/min. La densidad de corriente osciló entre 11 y 108 A/m<sup>2</sup>.

Para evaluar la vida de los electrodos, el caudal aplicado fue de 6,3 m<sup>3</sup>/min y una densidad de corriente de 54 A/m<sup>2</sup> y el pH fue de 7. Después de la electrólisis, la masa perdida por el ánodo se determinó mediante la comparación de peso inicial y final.

## Resultados

Observaron que la eliminación del cobre se relacionaba con el aumento del área alcanzando un valor óptimo de 35 cm<sup>2</sup> y decrece a mayor superficie. También han observado que en superficie pequeña existía una importante migración del cobre para alcanzar el cátodo. La concentración del hierro también aumentó al incrementarse el área para la electrogeneración.

En este contexto, los investigadores sostienen que el sistema electroquímico puede comportarse como un captador (condensador) y la corriente capacitiva podría ser más importante que la corriente farádica. Por otra parte bajo las condiciones de pH investigadas, el cobre precipita parcialmente en forma de hidroxilado y la fracción restante del cobre se elimina por electrólisis.

Han observado que al aumentar la separación de los electrodos la eliminación de los metales se reducen, debido a la disminución del flujo de corriente y generación de coagulante. Encontraron que la distancia óptima para la eliminación del plomo fue de 2,0 cm, y para la eliminación de cobre y cadmio la distancia óptima fue de 2,5 cm.

La eliminación máxima de cobre y cadmio se alcanzó a pH de 5 a 7 respectivamente. La eficiencia de eliminación del plomo no cambió con el pH. A pH 7 todos los metales han mostrado un óptimo con una relación de flujo 3 cm<sup>3</sup>/min; y una densidad de corriente entre 31 y 54 A/m<sup>2</sup>.

Cuando la solución cambiaba a pH ácido la oxidación del Fe<sup>2+</sup> a Fe<sup>3+</sup> disminuye y por lo tanto la eliminación de los metales. Mientras que a pH alcalino favorece la oxidación del Fe<sup>2+</sup> a Fe<sup>3+</sup> así como la formación de polímeros coloidales hidroxilados insolubles e hidróxido férrico precipitables (Hiemenz P., et al., 1997), aumentando así la eficiencia de eliminación, hasta llegar a un 100%.

Se estableció una relación lineal entre la densidad de corriente y la masa de lodo generado. Otra relación lineal fue encontrada entre el consumo de energía específica y la densidad de corriente. Los resultados de la investigación suministran datos importantes para el desarrollo de un reactor de electrolítico a escala industrial.

**Vivek Narayanan N., et al., (2009), "Use of adsorption using granular activated carbon (GAC) for the enhancement of removal of chromium from synthetic wastewater by electrocoagulation".**

Los investigadores han realizado un estudio sobre la eliminación de cromo hexavalente de efluentes sintéticos mediante un sistema de electrocoagulación discontinuo, usando

electrodos de hierro-aluminio, y adsorción mediante carbón activado granulado (CAG). Los parámetros de trabajo estudiados han sido, el pH, la densidad de corriente, concentración de adsorbente, tiempo de funcionamiento, en un intento de lograr una mayor capacidad de eliminación.

Según los resultados obtenidos sostienen que la eficiencia de eliminación más eficaz del cromo (VI) se podría lograr cuando el pH inicial sea cerca de 8. La eliminación de cromo (VI), durante electrocoagulación, se debe al efecto combinado de la precipitación química, coprecipitación, y arrastre por coagulación y adsorción. Además, aumentando la densidad de corriente de 6,7-26,7 mA/cm<sup>2</sup> y el tiempo de funcionamiento de 20 a 100 min se incrementa la tasa de tratamiento, y se reduce la concentración de iones metálicos por debajo de los niveles legales admisibles. La adición de CAG como adsorbente provoca un notable incremento en la velocidad de eliminación del cromo a densidades de corriente inferiores y con menor tiempo de funcionamiento, en comparación con el proceso de electrocoagulación convencional. Sostienen que el método estudiado ha resultado ser muy eficiente y relativamente rápido en comparación con las técnicas convencionales.

**Parga J. R., Cocke D. L., Valenzuela J. L., Gomes J. A., Kesmez M. Irwin J., Moreno H., Weir M., (2005). *Arsenic removal via electrocoagulation from heavy metal contaminated groundwater in La Comarca Lagunera México. Journal of Hazardous Materials, (artículo en prensa)***

Los investigadores sostienen que las personas con exposición durante su vida al arsénico desarrollan los síntomas clásicos de envenenamiento por arsénico. Existen varias opciones disponibles para la eliminación del arsénico de las aguas, la electrocoagulación es una técnica de tratamiento electroquímico muy prometedor que no requiere adición de reactivos químicos.

En este estudio se suministran los conceptos fundamentales de la electrocoagulación. Se han usado las técnicas de difracción de rayos X, microscopía electrónica, espectroscopía Mössbauer e infrarrojo con la transformada de Fourier para caracterizar los productos sólidos formados de los electrodos de hierro durante la electrocoagulación.

Los resultados sugieren que las partículas de magnetita e hidróxidos de hierro presentes en los productos de la electrocoagulación eliminan arsénico (III) y arsénico (V) con una eficiencia de más del 99% de las aguas subterráneas del estudio a escala piloto de campo.

Los investigadores han usado un sistema de electrocoagulación con aporte de aire, que consistía en un reactor de flujo cruzado con electrodos verticales paralelos, una bomba de alimentación peristáltica, una bomba de aire y un suministrador de potencia.

El agua contaminada con arsénico pasaba por un tubo poroso donde además inyectaban aire antes de pasar a través de los electrodos verticales en la celda de electrocoagulación. Usaron como ánodo y cátodo 7 electrodos de acero al carbono. La geometría vertical de las placas permite el uso de O<sub>2</sub> gaseoso, y el H<sub>2</sub> generado la electrolisis del agua facilita la eliminación de los iones ferrosos y férricos asociados con contaminantes de arsénico.

Los electrodos tenían unas dimensiones de (10 x 15,4 cm) con una separación de 6 mm, y el volumen interno del reactor fue de 1200 ml. Utilizaron un transformador variable para controlar la intensidad y el potencial.

El caudal alimentado fue de 600 ml/min, y se trataron de 2 – 4 litros de solución. Midieron el pH y la conductividad del lodo procedente de la electrocoagulación. Las muestras fueron analizadas por absorción atómica. Y para la curva de calibración utilizaron solución patrón de arsénico.

El agua contaminada con arsénico se recogió de pozos de agua subterráneos de La Comarca Lagunera de México. Y tenían un nivel de arsénico entre 0,025 y 0,05 ppm con una conductividad entre 600 y 4000  $\mu$ S y un pH entre 5,5 y 7,1. Las muestras fueron tratadas usando un tiempo de residencia de 1 minuto en el reactor, a un voltaje entre 20 y 30 V y una corriente de 5 A. Después de la electrocoagulación el arsénico residual en el agua fue de 0,002 ppm con un pH final de 8,5 y una conductividad final entre 500 y 2000  $\mu$ S. La eficiencia de eliminación del arsénico fue más del 99%.

A efectos comparativos, los investigadores han observado que el costo de energía fue de 0,002 \$ por metro cúbico de agua, pero el costo del agua tratada por el sistema utilizado era directamente proporcional a la cantidad de contaminantes.

**Kumar R. P., Chaudhari S., Khilar C. K., Mahajan S. P., (2005). *Removal of arsenic from water by electrocoagulation*. Chemosphere 55, 1245 – 1252.**

En el presente estudio se evaluó la electrocoagulación como tecnología de tratamiento de eliminación de arsenitos y arseniatos de las aguas. Los experimentos a escala de laboratorio se realizaron con electrodos de hierro, aluminio y titanio para investigar su eficiencia.

La eliminación de arsénico más eficiente fue con los electros de hierro. La electrocoagulación fue capaz de rebajar la concentración de disoluciones acuosas de arsénico por debajo de 10 µg/l con los electrodos de hierro.

Han variado las densidades de corriente de 0,65 a 1,53 mA/cm<sup>2</sup>, y observaron que a altas densidades de corriente se alcanza rápida eliminación de arsénico. Los resultados experimentales a diferentes densidades de corriente indicaron que la eliminación de arsénico se normalizó con respecto a la carga eléctrica total, y por tanto la densidad de carga se usó para comparar los resultados.

Se observó que el efecto del pH en la eliminación de arsénico no tiene influencia en el rango de 6 a 8.

Se realizó una evaluación comparativa de la eliminación por coagulación con cloruro férrico y electrocoagulación tratando As(III) y As(V). La comparación demostró que la electrocoagulación tiene más eficiencia en la eliminación del As(III), mientras que la eliminación del As(V) era prácticamente igual.

El mecanismo de eliminación de As(III) por electrocoagulación parece ser por la oxidación del As(III) a As(V) y subsecuente eliminación por adsorción complejación con los hidróxidos del metal generados en el proceso.

A los 5 minutos de electrocoagulación a pH 7, han observado que la concentración inicial de arsénico bajó hasta un 50 - 60% y la concentración residual de arsénico en el agua era inferior al 10 µg/l. Al comienzo del proceso de EC la eliminación del arsénico es rápida y después disminuyó gradualmente a lo largo de casi todo el proceso. Debido a que los iones de arsénico son más abundantes al comienzo de la EC, y los hidróxidos de hierro generados, debido a la

corrosión de los ánodos, ayudan a la formación de complejos con arsénico y, por tanto, la rápida eliminación de arsénico.

### **Efecto de densidad de corriente**

Algunos investigadores han informado de que en electrocoagulación, la densidad de corriente pueden influir en la eficiencia del tratamiento (Pouet y Grasmick, 1995), mientras que otros han informado de que la densidad de corriente no tiene importancia sobre el efecto de la eliminación de contaminantes (Chen et al., 2000).

Por lo tanto, no queda claro que si la densidad de corriente afecta a la eficiencia de tratamiento o no. Los investigadores han podido observar que existe una fuerte disminución de la concentración de arsénico sólo al comienzo del proceso para ambas densidades de corriente experimentada. Han concluido que la densidad de corriente no tiene efecto significativo al final del proceso en la eliminación total del arsénico, pero han observado que la eliminación fue rápida con alta densidad de corriente. Esto indica que no es la densidad de corriente, pero puede ser la densidad de carga la que realmente afecta a la eficiencia del tratamiento.

### **Efecto de la densidad de carga**

Los investigadores consideran que la densidad de corriente no es un parámetro adecuado para evaluar la eliminación del arsénico presente en el agua, pero la carga que pasa por litro de solución parece ser un parámetro adecuado para su evaluación. También han observado que la eliminación del arsénico aumentó con el incremento de las dosis de hierro en el proceso de coagulación (Edwards, 1994; Hering et al., 1996). Por lo tanto cabe esperar que en la electrocoagulación, la eliminación del arsénico esté gobernada por la formación de hidratos de óxidos de hierro en la solución. De acuerdo con la ley de Faraday, la carga que pasa a la solución es directamente proporcional a la cantidad de hierro disuelto (Vik et al., 1984). Esto implica que la eliminación del arsénico por electrocoagulación puede ser regida por la formación de complejos de óxido de hierro hidratado y que depende además de la carga total que pasa a través de la solución. Por lo tanto la densidad de carga parece ser un parámetro adecuado



para la comparación de los diferentes resultados experimentales y que también puede servir como un parámetro para el diseño de proceso de electrocoagulación.

### **Efecto del pH**

Han observado un ligero aumento del pH durante el proceso, que puede ser debido las reacciones de adsorción de As (V) y As (III), que liberan grupos OH<sup>-</sup> adsorbentes como resultado del intercambio de ligando (Arienzo et al., 2002).

La eliminación del As (III) y As (V) por adsorción a óxidos de hierro normalmente se comportan de forma diferente en distintos pH (Edwards, 1994; Hering et al., 1996; Bose y Sharma, 2002). Su y Puls (2001) han informado de que As (III) muestra una mayor eliminación que As (V), y la mezcla de As (V) y As (III) mostró una eliminación intermedia por óxidos de hierro.

Los estudios sobre el efecto del pH lo realizaron bajo condiciones controladas de pH en una serie de experimentos, mediante la adición de NaOH o HCl para mantener casi constante en un rango de pH 6-8. Además, han observado que la eliminación del As (III) y As (V) fue del 97-99% en toda la gama de pH experimentado, sostienen que este comportamiento puede explicarse teniendo en cuenta la presencia de las mismas especies tanto del arsénico como de los óxidos de hierro hidratado, por lo tanto, es probable que el efecto del pH no serían significativas en la eliminación del arsénico. Resultados similares se han reportado en estudios anteriores (Arienzo et al., 2002).

### **Hansen H. et al., (2007), "Electrocoagulation in wastewater containing arsenic: Comparing different process designs", *Electrochimica Acta* 52, 3464-3470**

Los investigadores han realizado un estudio sobre el tratamiento de aguas residuales conteniendo arsénico por electrocoagulación e hicieron una comparación de procesos de diferentes diseños. En el proceso de electrocoagulación cuando se aplica un voltaje de corriente continua, los ánodos se sacrifican para producir iones de Al<sup>3+</sup> o Fe<sup>2+</sup>. Estos iones metálicos generados electroquímicamente son buenos coagulantes [Yousuf M., A. 2001]. Las investigaciones sostienen que la geometría del reactor afecta los parámetros de operación Incluyendo la ruta de burbuja, la eficacia de flotación, la formación de flóculos, el régimen de circulación del fluido, características de mezclado y sedimentación.

Hicieron un ensayo preliminar del proceso de electrocoagulación en un depósito de sedimentación con modificación del flujo. Fue posible eliminar un 98 % arsénico de la solución que contenía 100 ppm de arsénico usando electrodos de hierro. Han considerado que era necesaria la introducción de aire para garantizar la oxidación del hierro disuelto.

El propósito de la investigación fue comparar la eliminación del arsénico del agua residual por tres procesos de diferentes diseños y configuraciones:

- (I) un depósito de sedimentación con modificación del flujo, usando placas de hierro. El lodo se depositó en el área inferior del decantador.
- (II) un reactor por lotes de flujo turbulento
- (III) Reactor por lotes con evacuación de agua por aire comprimido.

Las principales reacciones en los electrodos son:

- a) Reacción anódica, donde se produce la oxidación del Fe, a ion ferroso y luego éste a ion férrico.
- b) Reacción catódica, donde la solución en el cátodo se vuelve alcalina con el tiempo. La aplicación de la corriente fuerza la migración de iones  $\text{OH}^-$  hacia el ánodo, favoreciendo la formación de hidróxido férrico ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ).
- c) Co-precipitación del arseniato o por adsorción con el  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .

El estado de oxidación del As en agua son As(III) y As(V). El As(V) es predominante en aguas superficiales aeróbicas, mientras que el As(III) se encuentra en aguas subterráneas anaeróbicas.

En rangos de pH 4-10 predomina el As(V) presentando una carga neta negativa. Las especies As(III) no tienen carga neta. En base a esto los investigadores sostienen que la eficiencia de eliminación del As(V) debería ser mayor que los aniones del As(III), ya que los aniones ( $\text{AsO}_4^{3-}$ ,  $\text{HAsO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ) son adsorbidos por los coloides de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Por lo tanto indican que para incrementar la eliminación del As fue necesario oxidar el As(III), a As(V).

Han preparado el agua residual disolviendo arsenito sódico de grado analítico en agua destilada a una concentración de 100 mg de As/l, como oxidante han utilizado peróxido de hidrógeno.

La comparación de la eficiencia de distintos diseños ha sido con el fin de valorar la viabilidad de un diseño a escala mayor.

La concentración de arsénico presente en el agua residual de los hornos de fundición normalmente fluctúa entre 100 y 300 miligramos/l.

Las variables estudiadas han sido: densidad de corriente, clase de arsénico, adición de oxígeno, tiempo de retención.

Los investigadores sostienen que la electrocoagulación de As (V) en las aguas residuales es una tecnología prometedora de remediación. Los experimentos realizados con tres procesos de diferentes diseños mostraron la posibilidad de eliminar el arsénico como As adsorbido o co-precipitado con hidróxido de hierro (III).

**Hansen H. K., Núñez P., Grandon R., (2006). "Electrocoagulation as a remediation tool for wastewaters containing arsenic".**

Los investigadores han realizado cinco experimentos de electrocoagulación. En el primer experimento han utilizado 100 mg/l de solución de arsenito y en los otros cuatro (Experimentos 2-5) el As(III) fue inicialmente oxidado a As (V). La celda se llenó inicialmente con una solución de As, y se alimentaron continuamente, con un caudal de 3 l/h. En los experimentos 1, 3, 4 y 5, el aire fue burbujeado entre las placas de los electrodos con el fin de asegurar a la oxidación de Fe<sup>2+</sup> a Fe<sup>3+</sup>. En el experimento 2 se introdujo aire a la celda. Se invirtió la corriente cada 2 min para evitar la pasivación del ánodo. Un precipitado rojo naranja formado durante los experimentos y se recogió en la sedimentación. Las muestras de los efluentes fueron recogidas cada 15-30 minutos y se midió la concentración total del As.

Han observado, tres factores importantes: (a) la necesidad de oxidar el As (III) a As (V), (b) la importancia de las burbujas de aire, y (c) la eficiencia de la densidad de corriente. El primer factor se debió a que, casi ningún As (III) es eliminado con una densidad de corriente de 0,8 A/dm<sup>2</sup> (experimento 1). En comparación, que el As (V) se elimina en un 80% con la misma densidad de corriente después de 2 horas (experimento 3). Se produjo un precipitado rojo-naranja indicando la presencia del Fe(OH)<sub>3</sub> en ambos experimentos, pero As(III) no fue adsorbido ni co-precipitado con estas partículas sólidas.

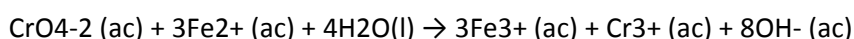
Esto significa que para el uso de la electrocoagulación como un proceso de remediación, el arsenito debe ser oxidado a arseniato.

Cuando han analizado el efecto de las burbujas de aire, han visto que en el experimento en donde no introdujeron aire (experimento 2), no observaron una eliminación significativa de arsénico. Dicen se debió probablemente a que en el experimento 2 el Fe sólo fue oxidado a Fe<sup>2+</sup>. Mientras que en los experimentos, en los que introdujeron aire, la eliminación del arsénico aumentó manteniendo otras condiciones operacionales. El Fe<sup>2+</sup> se oxida a Fe<sup>3+</sup> por el O<sub>2</sub> disuelto en la solución acuosa, y se formó el Fe(OH)<sub>3</sub>, y As (V) se adsorbió o co-precipitó con el óxido. Consideran que el burbujeo de aire no sólo fue para oxidar Fe<sup>2+</sup> a Fe<sup>3+</sup>, sino también para promover la coagulación/floculación debido a la turbulencia en la celda de electrocoagulación. El aumento de la densidad de corriente a 1,2 A/dm<sup>2</sup> (experimento 4) mejoró la eficiencia. Por lo tanto sostienen que a mayor densidad de corriente la dosificación de Fe<sup>3+</sup> y OH es superior, y una mejor eliminación del As. Por otro lado, al aumentar la densidad de corriente a 1,5 A/dm<sup>2</sup> (experimento 5) observaron que no hubo realmente diferencia en la eliminación. Indican que la pasivación del ánodo podría ocurrir a densidades más altas, por lo cual recomiendan que se debe invertir la corriente con mayor frecuencia cada 2 minutos a fin de evitar la pasivación.

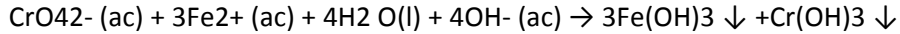
Los autores concluyen que la electrocoagulación de soluciones de As (V) en un reactor de flujo continuo es una herramienta prometedora de remediación. Los experimentos han demostrado que la eficiencia de eliminación de una solución de 100 mg de As (V)/l fue de más del 98% para una densidad de corriente de 1,2 A/dm<sup>2</sup>, y un tiempo de residencia de alrededor de 9,4 minutos con un caudal de 3 l/h.

#### **Mollah M. Y., et al., (2001), "Electrocoagulation (EC)- science and applications"**

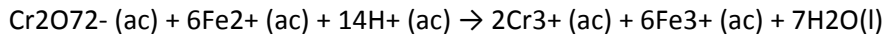
Los investigadores sostienen que se pueden eliminar iones de Cr<sup>6+</sup> (CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), por la técnica de electrocoagulación usando ánodos de sacrificio de hierro. El ion ferroso (Fe<sup>2+</sup>) generado por la electrooxidación del ánodo de hierro puede reducir el Cr<sup>6+</sup> a Cr<sup>3+</sup> bajo condiciones alcalinas y éste es oxidado a Fe<sup>3+</sup> como se puede observar en la siguiente ecuación:



O también:



El ion  $\text{Cr}^{3+}$  acuoso luego precipita como  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  por el incremento del pH de la solución. El  $\text{Fe}^{2+}$  acuoso puede también reducir al  $\text{CrO}_7^{2-}$  acuoso bajo condiciones ácidas de acuerdo a la siguiente reacción:



La eliminación de los metales pesados mediante el proceso de electrocoagulación puede conseguirse también por adsorción y absorción a los hidróxidos poliméricos de  $\text{Al}^{3+}$  o  $\text{Fe}^{3+}$ .

**Zongo I., et al., (2009), "Removal of hexavalent chromium from industrial wastewater by electrocoagulation: A comprehensive comparison of aluminium and iron electrodes".**

Los investigadores han estudiado la eficiencia y el comportamiento de los electrodos de Al y Fe en el tratamiento de Cr (VI) que contienen las aguas residuales mediante el proceso de electrocoagulación. Para ello han utilizado una celda electroquímica en forma de canal rectangular de 70 x 150 mm, la separación entre electrodos fue de 20 mm, el flujo de recirculación fue de 2,5 cm<sup>3</sup>/s, y la densidad de corriente ha sido variada entre 50 – 200 A/m<sup>2</sup>, y el tiempo de residencia fue de 60 minutos. Cuando han trabajado con electrodos de aluminio el pH lo han ajustado a 7,5 para favorecer la precipitación tanto del Al (III) y Cr (III). Con electrodos de aluminio, han observado que la presencia de Cr (VI) no afecta a la reducción de DQO. Además, vieron que el Cr (VI) se eliminaba más rápido de las aguas residuales mediante la aplicación de altas densidades de corriente. Sin embargo, con electrodos de Fe, observaron que la eliminación de DQO por electrocoagulación se retardaba por la presencia del Cr (VI). Los diferentes índices de reducción de la DQO con electrodos de Al y Fe, sugieren que la eliminación por precipitación del Cr (III) generado, puede deberse en particular a la presencia del coagulante  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , para un pH por debajo de 9, donde el cromo trivalente se encuentra también en la forma de hidróxidos catiónicos. Además sostienen que, la eliminación del Cr (VI) de las aguas residuales en la celda con electrodos de hierro puede ser modelado satisfactoriamente teniendo en cuenta las reacciones químicas del Fe (II) electrogenerado,

debido a la oxidación por el oxígeno del aire, y la reducción electroquímica de Cr (VI) en el cátodo de hierro.

**Heidmann I., et al., (2008), "Removal of Cr(VI) from model wastewaters by electrocoagulation with Fe electrodes".**

Los investigadores han evaluado el rendimiento de un sistema de electrocoagulación con electrodos de hierro para la eliminación del Cr (VI) de las aguas residuales a escala de laboratorio. Los parámetros estudiados han sido: la concentración inicial del metal (10-50 mg/l de Cr), carga eléctrica, y corriente aplicada, e investigaron su influencia en el proceso de electrocoagulación. El Cr disminuyó sólo ligeramente con el tiempo de coagulación a altas corrientes (1.0-3.0 A), mientras que a bajas corrientes (0.05-0.1 A), 10 mg/l de Cr fue removido por completo de la solución después de 45 min. Observaron que no han tenido influencia las concentraciones iniciales de Cr de 10 a 50 mg/l sobre las tasas de eliminación a corrientes bajas, mientras que a altas concentraciones iniciales han alcanzado altas tasas de eliminación a altas corrientes. En todas las corrientes investigadas, la concentración del Cr (VI) siempre fue un poco inferior a la concentración del Cr total y la concentración el Fe<sup>2+</sup> en la solución estuvo siempre por debajo de 0,1 mg/l.

Sostienen que el estudio dio indicios de dos mecanismos diferentes de eliminación del Cr (VI) con electrodos de hierro a alta y baja corriente. Han propuesto que a altas corrientes el Cr (VI) se reduce directamente en el cátodo y es precipitado después como Cr(OH)<sub>3</sub>. La eliminación del Cr dependió de la concentración inicial y de la velocidad de eliminación (μmol/A.s). A bajas corrientes la eliminación del Cr (VI) fue debido a la reducción del Fe<sup>2+</sup>. A estas condiciones, el hierro fue disuelto cuantitativamente como Fe<sup>2+</sup> de los electrodos de acuerdo con la ley de Faraday y la cantidad disuelta eran en dos órdenes de magnitud superior a la disolución de hierro a altas corrientes. El proceso de eliminación a bajas corrientes fue mucho más eficiente y puede ser aplicable para la eliminación del Cr (VI) de aguas residuales industriales. Y concluyen que a corrientes por debajo de 0,1 A hacen que el proceso sea eficiente y otros costos podrían reducirse por la disminución de la corriente aplicada y ampliar el tiempo de retención.

## 2.7. En relación con el séptimo objetivo. “Efectos de la electrocoagulación sobre las aguas prepotables”

**Ghernaout D., et al., (2008), “Application of electrocoagulation in *Escherichia coli* culture and two surface waters”**

Los investigadores han desarrollado un estudio experimental a nivel laboratorio de electrocoagulación, como tratamiento de electro-desinfección de dos aguas sintéticas conteniendo cepas de E. Coli , utilizando diferentes tipos de electrodos. La primera muestra de agua superficial tenía una dureza de 800 mg/l de CaCO<sub>3</sub>, y la segunda tenía alta concentración de algas a las cuales añadieron cepas de E. Coli. La superficie activa sumergida para cada electrodo era de 49,5 cm<sup>2</sup> y la distancia entre ellos era de 5 cm.

En relación al efecto de la intensidad de corriente los resultados mostraron que al aumentar la intensidad de corriente de 0,1 A a 1 A, la reducción de la concentración de células de E. Coli medidos en absorbancia fue del 80% al 98%, usando electrodos de acero corriente con un tiempo de electrocoagulación de 35 minutos. De acuerdo al efecto del pH, encontraron que a pH ácido (pH = 2) la eliminación de la concentración de E. Coli fue de un 29%, a pH neutro fue de 98% y a pH alcalino (pH = 9) fue del 100% con un tiempo de retención de 20 minutos y 1 A, con electrodos de acero corriente.

En relación a los tipos de material de electrodo, han utilizado electrodos de acero corriente, de acero inoxidable y de aluminio. Los resultados han mostrado que, los electrodos de aluminio han sido más eficientes en la destrucción de células de E. Coli en comparación con electrodos de acero inoxidable y acero corriente. Solo 30 minutos han sido requeridos para eliminar totalmente las células de E. Coli. La electrocoagulación muestra similares eficiencias en la eliminación de algas y coliformes totales en las 2 aguas superficiales estudiadas. Sostienen que los principales mecanismos que intervienen en la eliminación de microorganismos por electrocoagulación son por efectos directos e indirectos, los directos son la neutralización de los microorganismos por campo eléctrico y los efectos indirectos son por el contacto de los microorganismos con oxidantes generados por la electrolisis del agua y disolución anódica, seguidos por su flotación o sedimentación.

**Jia-Qian Jiang, Nigel Gram., Cecile André, Geoff H. Kelsall, Nigel Brandon, (2002), “Laboratory study of electro-coagulation-flotation for water treatment”, Water Research 36, 4064 – 4078.**

Un proceso electrocoagulación – flotación ha sido desarrollado para el tratamiento de agua. Se utilizó un reactor electrolítico con electrodos de aluminio y un tanque de separación/flotación. El agua ha sido tratada pasando a través del reactor y fue sometido a coagulación/flotación, por iones de Al (III) disueltos de los electrodos, los flóculos resultantes eran capturados por las burbujas de hidrógeno gas generado en la superficie del cátodo. Han encontrado que aparentemente la eficiencia del Al(III) ocurrió a pH 6,5 y 7,8. La energía eléctrica consumida en el reactor para el tratamiento del agua potable fue bajo alrededor de 20 kWh/ (kg Al)-1 para una densidad de corriente de 10 a 20 A m<sup>-2</sup>. La eficiencia del tratamiento de agua por electrocoagulación fue superior al tratamiento por coagulación convencional con sulfato de aluminio, removiendo 20% más del carbono orgánico disuelto en el agua a tratar.

La investigación fue realizada utilizando 2 tipos de agua, uno coloreada de tierras altas y otra agua superficial del río Thames. Han medido el carbono orgánico disuelto por UV, midiendo la absorbancia a 254 nm, color (absorbancia visible a 420 nm), pH y conductividad.

Los resultados obtenidos con ambas tecnología fueron similares en la eliminación del color que fue de un 20% y para el UV-abs 254 un 14%, trabajando a un pH de 6,5.

**Peter k. Holt, Geoffrey W. Barton, Cynthia A. Mitchell, (2005), “The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology”, Chemosphere 59, 355-367.**

La electrocoagulación es un método electroquímico de tratamiento de agua contaminada, por lo cual al corroerse deja en libertad precursores de coagulante activo, normalmente aluminio o hierro en la solución. Acompañando a la reacción electrolítica se desarrolla gas en el cátodo, normalmente burbujas de hidrógeno.

El sistema de reactor utilizado por los investigadores fue construido de Perspex y tenía una capacidad máxima de 7,1 l. El contaminante que se utilizaron fue arcilla de alfarero. Han intercalado cátodos de acero inoxidable con cuatro ánodos de aluminio, utilizando varillas de latón para conectar en paralelo las placas de electrodos. Los electrodos tienen una activa



superficie de 732 cm<sup>2</sup>. Han medido la conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, la salinidad, pH y la temperatura.

El trabajo examina e identifica conceptualmente las interacciones entre la electroquímica, coagulación y flotación enfocado a la electrocoagulación. Muestra datos experimentales realizados en un reactor batch, eliminando sólidos en suspensión.

Los investigadores concluyen que el proceso de electrocoagulación tiene un futuro importante en la tecnología del tratamiento de agua a bajo costo, y de bajo mantenimiento. En la serie de experimentos realizados han demostrado claramente dos resultados importantes. En primer lugar, que la densidad de corriente de funcionamiento es un parámetro clave, que no sólo afecta al tiempo de residencia del sistema, sino que también influye fuertemente en la separación de contaminantes. En segundo lugar estos resultados también parecen indicar que el funcionamiento del reactor, en la densidad más alta de corriente admisible, no podrá ser la más eficiente. Para cualquier aplicación específica, la densidad de corriente invariablemente participará en la relación de los gastos operacionales y el uso eficiente del coagulante introducido.

**Kerwick M. I., Reddy S. M., Chamberlain A. H. L., Holt D. M. (2005). *Electrochemical disinfection, an environmental acceptable method of drinking water disinfection. Electrochimica Acta 50, 5270-5277.***

En este trabajo los investigadores muestran estudios y experiencias sobre el uso de la desinfección electroquímica como alternativa a la desinfección con cloro. Para ello han utilizado una celda electroquímica Zappi<sup>TM</sup> que consistía en 2 electrodos de platino revestidos con mallas de niobio como ánodo cuya área total era de 522 cm<sup>2</sup>, y como cátodo 2 electrodos de acero.

Para el estudio han bombeado 10 litros de agua contaminada a la celda, con un caudal de 6 l/min por un periodo de tiempo de 120 minutos, aplicando un voltaje de 5 V.

Las experiencias de desinfección electroquímica demostraron ser efectivas sobre *Clostridium perfringens*, *Escherichia coli* y *Cryptosporidium parvum*.

Las conclusiones a que han llegado los investigadores son:

- La desinfección electroquímica fue más efectiva para aguas que contenían cloruros.
- La reducción de E. coli y el bacteriofago MS2 en la desinfección electroquímica fue de cuatro décadas logarítmicas.
- La desinfección en aguas conteniendo excesos de fosfatos fue limitado debido al ensuciamiento del electrodo.
- Los electrodos han sido regenerados después del ensuciamiento por inversión de la polaridad del electrodo.

**Yang J., Jia J., Liao J., Wang Y., (2004). "Removal of fulvic acid from water electrochemically using active carbon fiber electrode". *Water Research* 38, 4353 – 4360.**

Los investigadores sostienen que los ácidos húmicos son un grupo de compuestos orgánicos naturales de amplia difusión, con potencial para contaminar las aguas subterráneas. El ácido fúlvico es un ácido húmico de peso molecular relativamente bajo.

En este trabajo los autores han realizado estudios de la eliminación del ácido fúlvico de aguas con electrodos de fibra de carbón activo, usando fotometría, espectroscopia de fluorescencia, y analizador de carbono orgánico total.

El diámetro del reactor utilizado por los investigadores fue de 15 cm, y de 18 cm de alto, el volumen de la muestra tratada fue de 1 litro, alimentada por lotes. Los electrodos fueron hechos de fibra de carbono activo con una pieza de hierro fijados a los ánodos. Las dimensiones de los electrodos fueron de 50 x 100 mm<sup>2</sup>, con un grosor de 4 mm.

Han observado que cuando añadían la pieza hierro al ánodo el ácido fúlvico se coagulaba eficientemente en la primera etapa de tratamiento.

Propusieron un mecanismo de proceso de eliminación consistente en: absorción de ácido fúlvico sobre superficie de fibra de carbón activo, agregación del ácido fúlvico, desorción de los conglomerados de ácido fúlvico de la fibra de carbón activo, coagulación de los agregados de ácido fúlvico por el ánodo de  $n\text{Fe}(\text{OH})_2 \cdot m\text{Fe}(\text{OH})_3$ .

Han repetido los experimentos usando electrodos de grafito y de acero inoxidable y compararon con los resultados obtenidos con los electrodos de fibra de carbón activo.

Las muestras de sedimento del río Hui conteniendo ácido fúlvico fueron tratadas con éxito usando el electrodo de fibra de carbón activo a 20 V, durante 60 minutos de tratamiento llegando casi al 100% de rendimiento.

**Kimbrough D., Buffet I. H., (2002), *Electrochemical removal of bromide and reduction of THM formation potential in drinking water. Water Research (36): 4902 – 4906.***

Los subproducto de la cloración de las aguas naturales, conteniendo carbono orgánico disuelto y bromuros, son considerados potencialmente peligrosos para la salud pública y son regulados debido a su poder carcinogénico. Los trihalometanos (THMs) se forman por la interacción de la materia orgánica natural con bromuro y cloro.

Los autores han utilizado un reactor de flujo cruzado que consistió en un tubo de PVC con un diámetro interno de 5 cm y un volumen de 550 ml. Sobre la pared interna llevaba como cátodo 3 electrodos de varillas de carbono de 30,5 cm de largo y de 6,25 mm de diámetro y fueron colocados a igual distancia entre uno y otro sostenidos con nylon. Los ánodos eran varillas de titanio revestido con óxido de rutenio y óxido de titanio, de dimensiones iguales a los cátodos y colocados de la misma forma. Todas las varillas fueron conectadas a una fuente de alimentación de corriente continua en paralelo. El agua utilizada en la investigación tenía 314 mg/l de sólidos disueltos y una conductividad de 520  $\mu$ S.

Este trabajo los investigadores presentan un nuevo proceso de tratamiento de agua con bajas concentraciones de bromuro en el agua de bebida, baja formación de THM. El bromuro es oxidado por electrólisis a bromo y luego volatilizado. El agua electrolizada, cuando es clorada, produce bajas cantidades de THM y proporcionalmente menos THM bromados. Esta técnica puede ser útil para otros subproductos de desinfección, así como el ácido haloacético y bromatos.

**Ming Shing Lee. (2000), "Tratamiento del agua por medio de electroflotación y electrocoagulación".**

El inventor ha diseñado un método, un aparato y un sistema para tratar de forma continua un volumen de agua mediante la utilización de la polarización de un campo eléctrico para coagular las impurezas presentes en el agua de forma que puedan eliminarse fácilmente del agua.

Sostiene que cuando se ejecuta un procedimiento electroquímico, se producen simultáneamente seis funciones básicas entre los dos electrodos y en la solución electrolítica:

1. oxidación: Se proporcionan electrones al ánodo para oxidar las impurezas presentes en la solución.
2. reducción: Se proporcionan electrones por el cátodo para reducir las impurezas presentes en la solución.
3. electroforesis: Los iones con carga o cargas positivas se mueven desde el ánodo al cátodo; mientras que los iones con carga o cargas negativas se mueven desde el cátodo al ánodo.
4. ataque electroquímico: Si el ánodo está hecho de un metal barato, el ánodo se somete a una ionización de modo de oxidación para liberar cationes mediante la aplicación de un voltaje adecuado entre los dos electrodos, para hacer que la solución tenga la conductividad apropiada.
5. electrólisis: El agua se descompone en hidrógeno y oxígeno.
6. polarización: Las impurezas y las moléculas de agua se polarizan en respuesta a la aplicación del campo eléctrico formado entre los dos electrodos cuando se aplica el voltaje adecuado, de forma que los iones con carga o cargas negativas se acumulan cerca del ánodo y los iones con carga o cargas positivas se acumulan cerca del cátodo.

El inventor sostiene que normalmente las técnicas de electrocoagulación utilizan las 5 primeras funciones anteriores. Otras técnicas con flotación tienen mayor consumo de energía y largos tiempos de tratamientos. Para resolver los defectos de estas técnicas, han descubierto que la utilización de la función de polarización, es decir, la sexta función mencionada anteriormente, puede hacer que las moléculas de impurezas coagulen en un tiempo muy corto para conseguir los objetivos de la limpieza del agua, además tiene las ventajas de período de tiempo corto, bajo consumo energía y bajo mantenimiento.

Han descubierto que cuando se disponen varias placas conductoras entre el cátodo y el ánodo, y los electrodos y las placas conductoras se disponen para formar un circuito de flujo de una vía, ascendente, cerrado y con forma de S, las impurezas del agua coagulan formando un conglomerado en un tiempo muy corto, por ejemplo, de 1 minuto, si se genera un campo eléctrico con una intensidad suficiente entre los dos electrodos mediante la aplicación de un voltaje apropiado al cátodo y al ánodo.

Este método puede tratar de forma continua un volumen de agua, en el que las impurezas coagulan y flotan para retirarse fácilmente utilizando una función de polarización en respuesta a un campo eléctrico y una función de intercambio de energía.

Han realizado los siguientes experimentos:

- Con agua residual de tintes, con una DQO de 945 mg/l, SS de 170 mg/l, después del tratamiento con placas de aluminio los resultados fueron: la DQO 82 mg/l, SS de 5 mg/l con una densidad de corriente de 1,20 A/m<sup>2</sup>, y 150V. Mientras que con placas de hierro obtuvieron unos resultados de la DQO 120 mg/l, SS de 5 mg/l con una densidad de corriente de 1,67 A/m<sup>2</sup> y 200 V.
- Con agua residual de pulpa de papel, la DQO de entrada fue de 1010 mg/l, SS de 120 mg/l. El agua de salida después del tratamiento tenía una DQO de 90 mg/l, SS de 2 mg/l, a 200 V y 6 A/m<sup>2</sup> con electrodos de aluminio. Mientras que con electrodos de hierro obtuvieron unos resultados de la DQO de 120 mg/l, SS de 2 mg/l, a 50 V y 5,5 A/m<sup>2</sup>.
- Con agua residual de una fábrica de procesamiento de productos mecánicos, utilizando electrodos de titanio revestido con platino, y placas conductoras de hierro un número de 30, las condiciones de tratamiento fueron de 170V, intensidad de campo eléctrico de 8,5 V/cm<sup>2</sup>, pH 6,8; conductividad 840 μS/cm. Obtuvieron un rendimiento de la DQO de 99,97%, de SS de 99,99%, de grasas un 99,87%, de Fe un 99,92%.

- Otro experimento a 170 V, intensidad del campo eléctrico 8,5 V/cm<sup>2</sup>, con placa de titanio revestido de platino y placas conductoras de hierro en un número de 30. El agua residual tenía un pH de 6,7, conductividad de 780  $\mu$ S/cm, bacilos coliformes de  $2,6 \times 10^5$  NMP/100ml. El agua tratada tenía  $< 2$  NMP/100 ml de coliformes.
- A las mismas condiciones anteriores pero con una conductividad de 560  $\mu$ S/cm, pH 7,0 y una DBO de 653 mg/l, han logrado un rendimiento del 93,97% de la DBO.

**Bennajah M., et al., (2009), "Defluoridation of Morocco drinking water by electrocoagulation/electroflotation in an electrochemical external-loop airlift reactor".**

Los investigadores han estudiado la forma más efectiva y versátil de eliminar el fluoruro de las aguas de bebida mediante un reactor airlift innovador como celda de electrocoagulación/electroflotación con electrodos de aluminio. La recirculación y el mezclado del líquido fueron inducidos solo por las microburbujas generadas electroquímicamente del cátodo. La investigación fue llevada en un reactor airlift de 20 litros bajo condiciones de flujo continuo y semi-continuo.

Los resultados mostraron que la recirculación de líquido podría estar correlacionada con la densidad de corriente y la dispersión de gas-líquido en la altura del separador. Los datos experimentales obtenidos en condiciones óptimas confirmaron que las concentraciones de fluoruro inferiores a 1,5 mg/l se pueden alcanzar cuando la concentración inicial de F<sup>-</sup> esté entre 10 y 20 mg/l en el agua a tratar. Además, la baja relación superficie/volumen (S/V) del reactor airlift unido a la formación de microfloculos de fluoruro de aluminio cerca de los electrodos permite la adsorción del fluoruro sobre éstas partículas en la sección ascendente y separador del reactor, favoreciendo así los mecanismos que involucra a la coprecipitación química, o a la adsorción. En este sentido el reactor airlif difiere significativamente de la celda electroquímica convencional.

Concluyen que, la defluorización podría lograrse a un menor consumo de energía y de electrodos a condiciones óptimas de: densidad de corriente en  $j = 6$  mA/cm<sup>2</sup>, pH de 5. Otra ventaja de los reactores airlift es que se recuperan los floculos sólo por flotación, lo que evita la necesidad de un tanque de decantación debajo del reactor. Los experimentos usando

electrocoagulación en continuo fueron también prometedores para una aplicación futura al tratamiento de agua potable.

## 2.8. En relación con el octavo objetivo. “Efectos de la electrocoagulación sobre aguas residuales depuradas”

**Pouet M. F. et al., 1995, “Urban wastewater treatment by electrocoagulation and flotation”.**

Los autores sostienen que el proceso de electrocoagulación es una buena alternativa para el tratamiento de aguas residuales urbanas. La electrocoagulación consiste en la creación de un floculo de hidróxidos metálicos con el efluente a ser tratado, por electro disolución del ánodo. Comparado con la floculación – coagulación tradicional, la electrocoagulación tiene la ventaja de remover pequeñas partículas coloidales, y baja producción de lodo.

Los autores han investigado sobre el proceso de electrocoagulación con flotación con aire disuelto (DAF) en el tratamiento de aguas residuales. Utilizando una planta piloto de 0,318 m<sup>3</sup> para tratar efluente de 1 m<sup>3</sup>/h. Las características para la unidad de coagulación eran: Electrodo de aluminio; número de placas 21, la superficie del ánodo era de 0,15 m<sup>2</sup>, el voltaje de 0 – 80 V, amperaje 0 – 40 A.

Los resultados que obtuvieron lo han comparado con los resultados de un tratamiento químico de coagulación con sedimentación lamelar, que se muestra a continuación:

Disminución de la contaminación (%)	Agua tratada por electrocoagulación –flotación	Agua tratada por coagulación-sedimentación lamelar
Sólidos suspendidos	85 %	93 %
Turbidez	90 %	95 %
DQO	75 %	80 %

En relación con la eliminación del ortofosfato que contiene un 80% de fósforo total, fueron eliminados un 100% de ortofosfato.

El consumo de reactivos químicos fue dos veces más bajo en el proceso de electrocoagulación, además la producción de lodo seco fue un poco menor en este proceso.

**Hutnan M., et al., (2006), “Anaerobic stabilization of sludge produced during municipal wastewater treatment by electrocoagulation”.**

Los investigadores han realizado un estudio utilizando una pequeña planta de tratamiento de aguas residuales de electrocoagulación. La capacidad de la planta era para una población equivalente de 200 habitantes y un volumen medio de agua residual de 25 m<sup>3</sup>/día. El agua residual era homogeneizada y bombeada a 2 tanques paralelos de electrocoagulación – electroflotación de 308 litros cada uno, conectados entre sí.

El sistema de electrodos estaba formado por electrodos de aluminio y hierro. Eran de forma cilíndrica concéntricos, alternado cada uno de la siguiente forma: Fe<sup>+</sup>- Al<sup>-</sup>- Al<sup>+</sup>-Fe<sup>-</sup>- Al<sup>+</sup>- Al<sup>-</sup>- Fe<sup>+</sup>- Al<sup>-</sup>- Al<sup>+</sup>- Fe<sup>-</sup>. Alternativamente los polos de los electrodos eran alimentados con corriente continua, con un voltaje de 40 V y un rango de intensidad de corriente de 50 – 200 A.

Han logrado una eficiencia promedio en la eliminación de la DQO más del 80% (el rango de la eficiencia estuvo entre 66,7 a 92,4%). Alcanzaron alta eficiencia en la eliminación de fósforo, debido a la precipitación con los iones Fe<sup>+3</sup> y Al<sup>+3</sup> procedentes de los electrodos, formando fosfatos insolubles. Mientras que la reducción del nitrógeno disuelto fue mínimo.

Los lodos obtenidos por este proceso se llevaban a una digestión anaerobia. Según los resultados obtenidos, los investigadores concluyen que la digestión de este tipo de lodo es menos efectiva en comparación con los lodos procedentes de una planta de tratamiento de aguas residuales convencionales.

**Chen Guohua et al., 2000, “Separation of pollutants from restaurant wastewater by Electrocoagulation”.**

Han investigado sobre las aguas residuales de los restaurantes, caracterizados por su alto contenido en aceite y grasas. En Hong Kong existen aproximadamente 9,000 restaurantes con un total de más 180,000 empleados. Adicionalmente hay más 200 tiendas de comida rápida. Más de medio millón de toneladas de agua es consumido todos los días por esta industria. Sin



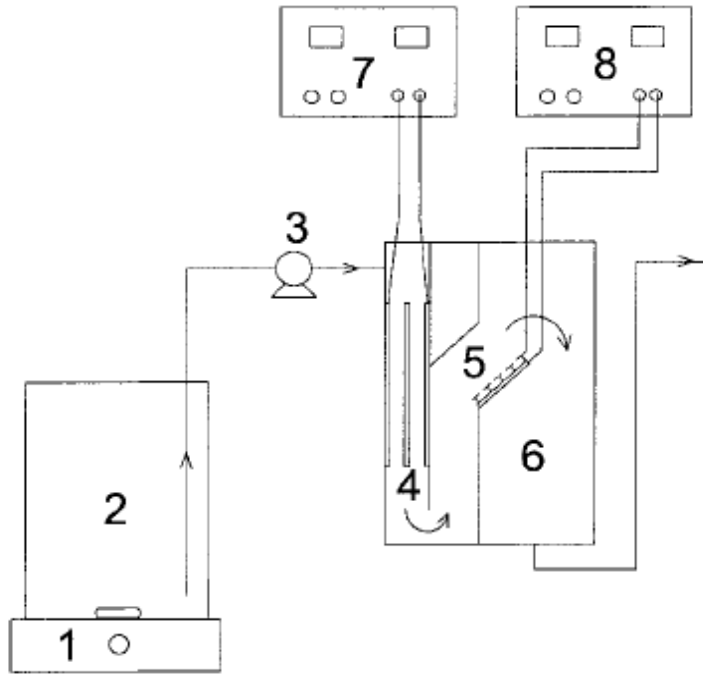
embargo, pocos sistemas de tratamiento de las aguas residual y de reutilización han sido instalados en los restaurantes. La introducción directa del agua residual al sistema de alcantarillado grava una carga cuantiosa sobre el agua residual municipal. Debido a la falta del espacio en muchos restaurantes de Hong Kong, los sistemas de tratamientos compactos y eficaces son esenciales. En un estudio previo (Chen, et al.. 2000), la electrocoagulación fue usado para tratar esta clase de agua residual. Descubrieron que la electrocoagulación era rápida y eficaz con respecto a la desestabilización y agregación de partículas finas.

El gas de hidrógeno producido en el cátodo de la celda de electrocoagulación podía hacer flotar solamente aproximadamente dos tercios de los flóculos totales. El efluente que aún lleva una gran cantidad sólidos suspendidos (SS), necesitan ser separados en tratamientos posteriores.

En este estudio, un sistema de electrocoagulación y electroflotación combinado, es empleado para tratar agua residual de restaurante. El proceso de electrocoagulación tienen el papel de desestabilizar y agregar las partículas finas, y la electroflotación es responsable de hacer flotar a los flóculos que se forman en el efluente de la unidad de electrocoagulación. Aunque ambos electrocoagulación y electroflotación ha sido ampliamente usado en el tratamiento de agua. Como se puede observar en las siguientes citas: Tratamiento del agua residual (Dobolyi 1978; Matis 1980; Vik, et al., 1984; Demmin y Uhrich 1988; Renk 1988; Murphy, et al.. 1992; Ogutveren et al.. 1992; McClung y Lemley 1994; Matteson et al.. 1995; Pouet y Grasmick 1995; Lin y Chen 1997), era nueva la combinación de electrocoagulación y electroflotación. El objetivo del estudio era revisar la viabilidad de esta combinación e investigar los efectos de las variables de operación sobre el rendimiento.

Parte experimental

La configuración experimental es mostrada esquemáticamente en la siguiente figura.



La celda de electrocoagulación tenía tres electrodos de aluminio, cada uno con una dimensión de 55 x 100 x 3 mm, y un área efectiva de 50 cm<sup>2</sup>. El espaciado de red entre electrodos de aluminio era 4 mm. La celda de electroflotación tenía dos electrodos. Su ánodo estaba hecho de Ti / IrO<sub>2</sub>TaO<sub>5</sub>, preparado por procedimiento de descomposición térmico (Vercesi et al., 1991; Mraz y Krysa 1994). El ánodo de Ti / IrO<sub>2</sub>TaO<sub>5</sub> tenía una dimensión de 45 x 50 x 1,6 mm y un área efectiva de 20 cm<sup>2</sup>.

El cátodo de la celda de electroflotación era de acero inoxidable, la malla fue armada y tenía la misma longitud y ancho que el ánodo. Había un separador de 2 mm de grosor ubicado entre el ánodo y el cátodo. La celda de electroflotación fue instalada con un ángulo de 45° respecto al plano horizontal. El agua residual fluyó en forma descendente a la unidad de electrocoagulación y de forma ascendente dentro de la celda de electroflotación.

Debido a que algunos de los contaminantes, especialmente SS, podría decantarse durante el experimento, el tanque de alimentación fue agitado constantemente para mantener un influente uniforme, previo al sistema de tratamiento.

Se han analizado la demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), DQO, SS, pH, grasas, aceites y la conductividad.

### Caracterización de aguas residuales de restaurantes

Un total de 48 muestras fue coleccionado de cinco restaurantes y se analizaron en la universidad de Ciencia y Tecnología de Hong Kong. El agua residual de los restaurantes es una mezcla de agua de limpiar carne y verduras, lavado platos, cacerolas y otras vasijas, y limpieza de suelos. Por lo tanto, es de esperar que la composición del agua residual de diferentes cocinas varíe significativamente. Mientras tanto, la comida servida en el restaurante depende del tiempo del servicio, por ejemplo, desayuno, almuerzo, o cena. Por lo tanto es casi imposible tener una lista de los datos caracterizados del agua residual del restaurante. En vez, un rango de los valores de cada uno el parámetro es dado para cada restaurante.

Los resultados son presentados en el cuadro siguiente. Puede observarse que el contenido de aceite y grasa es muy alto en todos los casos, superior a 100 miligramos /l, que es el nivel permitido para verter a la alcantarilla en Hong Kong. La concentración de contaminante varía ampliamente, así como la conductividad. Los valores más altos de DQO, aceites y grasas se han encontrado en el restaurante de comida rápida estadounidense y del oeste. El contenido de la SS más alto fue encontrado en el comedor de estudiantes, que suministra comida china y comida rápida.

### Caracterización de aguas residuales de restaurantes

Parámetros	R. Chino	R. Oeste	R. Comida rápida	Comedor estudiantes	Bistro UC	Estándar permitido
Nº de muestras	10	10	11	14	3	-
pH	6,62-7,96	6,94-9,47	6,30-7,23	6,82-8,76	6,03-8,22	6-10
DQO (mg/l)	292-3390	912-3500	980-4240	900-3250	1500-1760	3 000
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	58-1430	489-1410	405-2240	545-1630	451-704	1 200
Aceite- grasas (mg/l)	120-712	52-2100	158-799	415-1970	140-410	100
SS (mg/l)	13.2-246	152-545	68-345	124-1320	359-567	1 200
Conductividad $\mu$ S/cm	227-661	261-452	254-706	233-1570	341-514	-

## Conclusiones

El proceso combinado de electrocoagulación y electroflotación es viable para el tratamiento de agua residual de restaurante.

El pH y la conductividad del agua de alimentación no afectaron la eficiencia de remoción de contaminantes. La densidad de carga en la electrocoagulación y electroflotación es la variable de operación más importante para la eficiencia de tratamiento.

El proceso combinado de electrocoagulación y de electroflotación tiene dos ventajas importantes, tiempo de retención corto y lodo producido más deshidratado. Las eficiencias de remoción de aceite y grasa, DQO, y SS son altas, siendo 99, 88, y 98 %, respectivamente, con tiempo de retención < 4,5 minutos. La cantidad de lodo seco fue de 0,20 – 0,37 kg/ (kg DQO eliminado). El consumo de total de energía fue de 0.5 kW. h / ( m<sup>3</sup> de agua residual) bajo condiciones operación típicas.

**Bahadir K. Körbahti, Abdurrahman Tanyolaç, (2003), “Continuous electrochemical treatment of phenolic wastewater in a tubular reactor”, Water Research 37, 1505 – 1514.**

La investigación realizada por los autores fue sobre el tratamiento electroquímico de las aguas residuales fenólicas, utilizando un reactor tubular continuo, construido de acero inoxidable con un ánodo cilíndrico de carbón en el centro.

Se han estudiado el efecto de remoción de fenoles a 25 °C, utilizando como electrolito NaCl con una concentración de 120 g/l, para una concentración inicial de fenol de 450 – 3100 mg/l de fenoles alimentados, con una densidad de corriente de 61,4 y 54,7 mA/cm<sup>2</sup> respectivamente.

El reactor tubular diseñado tenía un volumen de 1934 cm<sup>3</sup>, con una altura de 35 cm y un diámetro de 8,89 cm, y un grosor de 2 mm.

Los resultados obtenidos muestran que, para una concentración inicial de 450 mg/l de fenoles alimentados, la concentración decrece con el tiempo de residencia de 10 a 20 minutos, con reducciones de 56% y 78% respectivamente. A los 40 minutos el 100% del fenol fue removido.

Han encontrado que, a tiempos de residencia más elevados, se forman partículas sólidas en suspensión que causan una apariencia opaca, y el color de la solución en el reactor se tornó a marrón oscuro debido a la formación de productos poliméricos.

Con 3100 mg/l de fenoles en la alimentación y a tiempos de residencia de 1; 1,5; 2 y 3 horas la remoción del fenol fue de 42%, 71%, 81%, y 98% respectivamente.

Los resultados han indicado que el reactor tubular puede ser factible y alternativa segura para el tratamiento electroquímico de aguas residuales fenólicas. Ya que los análisis mostraron que, durante la electrolisis, se han formado productos fenólicos clorados mono, di y tri- sustituido junto con compuestos poliméricos, y todos los fenoles clorados fueron consumidos por polimerización y destrucción.

**Chuanping Feng, Norio Sugiura, Satoru Shimada, Takaaki Maekawa, (2005) *Development of a high performance electrochemical wastewater treatment system. Journal of Hazardous Materials B 113, 65-78,***

Los investigadores para formular un sistema electroquímico de máximo rendimiento, de uso práctico en el tratamiento de aguas residuales e industriales, han realizados experimentos de proceso electroquímico a nivel de laboratorio, de aguas residuales municipales. En base a los resultados obtenidos a nivel de laboratorio, han implementado un sistema de tratamiento electroquímico a escala piloto de 0,3 m<sup>3</sup>/h. Con el fin de evaluar el rendimiento del proceso de electrocoagulación han tratado aguas residuales domésticas, aguas de estanques conteniendo algas, aguas residuales de purines.

Los materiales utilizados para los cátodos de los reactores A y B fueron de acero inoxidable y el ánodo del reactor A fue de hierro y el ánodo del reactor B fue de Ti/RuO<sub>2</sub> – TiO<sub>2</sub>.

Los rendimientos alcanzados, tratando aguas residuales domésticas, fueron: en la eliminación de N- total un 73%, del P- total 99%, del NH<sub>4</sub>-N 81% y de la DQO 86%. Y tratando agua de laguna conteniendo algas la eliminación del N- total fue 83%, del P- total 90%, de la DBO 78%, de la DQO 92%, de los SS 97%, y la eliminación de clorofila A de las algas fue del 100%. Mientras que tratando aguas residuales de purines de cerdo no han logrado los rendimientos

esperados. Sostienen que es debido a la alta concentración de sólidos en suspensión y que para este tipo de agua el sistema de tratamiento electroquímico requiere un pretratamiento.

En este trabajo suministran las reacciones de eliminación y mecanismos de reacción de los contaminantes presentes en las aguas residuales. Además muestran el esquema de un dispositivo experimental en donde se realiza la electrocoagulación.

**Jung S., et al., (2005), "A combined method of electrocoagulation and electrolysis in the treatment of dye wastewater".**

Los autores han investigado sobre un método electroquímico combinado de electrocoagulación seguido de una electrólisis, con el fin de superar los problemas existentes en el proceso de tratamiento de aguas residuales de tintura.

Durante el estudio han investigado los parámetros de operación incluyendo la densidad de corriente, tiempo de electrólisis, concentración del electrolito y tipo de tinte.

En la investigación de electrocoagulación se llevó a cabo en 2 sistemas de paso, en el cual 2 pares de electrodos tipo tubo fueron conectados en serie a un rectificador de corriente continua con una capacidad máxima de 150 A y 26 V. Las características de los electrodos fueron los siguientes: Los diámetros interiores eran de 1,2 cm y los exteriores de 1,7 cm, y de los cátodos eran de 2,1 cm y 2,7 cm respectivamente con una longitud de 33 cm. Los ánodos fueron de acero al carbono (soluble) y los cátodos de acero inoxidable.

Para la electrólisis usaron electrodos tipo placas de titanio revestido con IrO<sub>2</sub> como ánodo y como cátodo placas de acero inoxidable. El grosor del ánodo fue de 0,1 cm y del cátodo fue de 0,4 cm. El espacio entre electrodos fue de 1,2 cm. La concentración del electrolito varió entre 0 – 1000 mg/l.

Como efluente ha utilizado agua sintética de diferentes tipos de tinte, el agua coloreada tenía concentración de 100 – 300 mg/l, los SS fue de 2 – 4 mg/l, turbidez de 339 – 1253 NTU, pH entre 7,22 – 8,96, conductividad entre 236 – 344  $\mu$ S/cm, DQO total (134-452 mg/l).

En la electrocoagulación el agua entraba al ánodo (+) y luego era descargado hacia el espacio anular entre ánodo y cátodo (-), el tiempo de retención fue de 0,8 – 1,7 minutos, a una velocidad de 0,75 – 1,25 cm/s, la intensidad de corriente fue de 5 – 15 A, la densidad de corriente fue de 142 – 284 A/m<sup>2</sup>, y el voltaje fue de acuerdo a la variación de la corriente eléctrica.

Han observado que usando la electrocoagulación solo han logrado una eliminación de la DQO entre 67 – 83%, y con solo electrólisis la eliminación fue pobre entre 9,7 – 35,3%. Mientras que con la combinación de electrocoagulación y electrólisis han obtenido un rendimiento de eliminación entre 74,5 – 96,8%.

Como conclusión sostienen que la eliminación de la DQO fue mejorado con el incremento la densidad de corriente, del tiempo de la electrólisis, y de la concentración del electrolito en la electrólisis. Y que la electrólisis fue efectiva para eliminación adicional de la DQO del agua residual de tintura.

**Bayramoglu M., Kobya M., Can T. O., Sozbir M. (2004). *Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. Separation and Purification Technology* 37, 117 – 125.**

Los investigadores sostienen que la electrocoagulación es un método eficiente para el tratamiento de las aguas residuales de la industria textil. Han realizado investigaciones enfocado principalmente al rendimiento técnico de este proceso, mientras que su aspecto económico ha sido generalmente despreciado.

El coste de operación incluye el costo material (principalmente electrodos), el costo de utilidad (principalmente energía eléctrica), así como, la mano de obra, mantenimiento y otros gastos fijos. El cálculo de los costes de explotación los ha determinado como kWh por kg de DQO eliminado.

Costo de operación + a C energía + b C electrodo

Donde, Cenergía y Celectrodo son consumos de estas cantidades por kilogramo de DQO eliminado. Los cuales son obtenidos experimentalmente.

Este trabajo trata del análisis de costo operación simplificada para el tratamiento de aguas residuales textiles usando electrodos de aluminio y hierro.

Se han evaluado los efectos de varios parámetros tales como la conductividad del agua residual, el pH, la densidad de corriente y tiempo de operación con relación al costo del proceso para cada material de los electrodos separadamente.

### **Efecto del pH**

El pH del medio cambia durante el proceso, dependiendo del tipo del material del electrodo. Mientras tanto, el proceso de electrocoagulación exhibe algunas capacidades tamponantes, especialmente en medio alcalino, lo que impide cambios bruscos del pH [Chen X., et al, 2000]. El efecto del pH inicial sobre eficiencia de eliminación de la DQO y turbidez usando electrodos de aluminio, en medio ácido, han encontrado que la turbidez se eliminó en un 98%, y la remoción de la DQO estuvo entre el 65 y 61%, y por encima de pH 6, estos valores de eliminación caen drásticamente. Electrodo de hierro, con un pH inicial de 3-7, la eliminación de la turbidez estuvo entre 75 - 98% y de la DQO entre 47 -77%, y a pH por encima de 10, la turbidez bajó a 87 y la DQO a 26%. Por lo tanto, han llegado a la conclusión de que, en medio ácido, la eficiencia de eliminación con electrodos de aluminio, mientras que a pH neutro y débilmente medio alcalino con electrodos de hierro fue más eficiente.

También han analizado el efecto del pH inicial sobre el costo de funcionamiento, comparando los materiales de aluminio y hierro. En el caso de aluminio, los costos operativos aumentan de manera constante conforma aumenta el pH, mientras que con electrodos de hierro, el costo de operación fue casi independiente del pH inicial entre 5 y 9, y esto fue tres veces menor que la de aluminio. Casi un 78% del coste total, es el costo del material de aluminio, mientras que para los electrodos de hierro estuvo entre 58-62% del coste total, esto fue realizado en base a los resultados el consumo de materiales de electrodos.

### **Efecto de la conductividad**

Han corroborado que el aumento de conductividad eléctrica causa un aumento de la densidad de corriente en la celda a un voltaje constante, o una disminución del voltaje de la celda a



densidad de corriente constante. Mientras tanto que el efecto de la conductividad en la eliminación de turbidez y de la DQO, así como sobre el costo de operación sostienen que no es muy sencillo, que fue preciso investigar experimentalmente. Han observado que la eficiencia de la eliminación de la turbidez se mantiene casi sin cambios a un rango de conductividad entre 1000-4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , para electrodos de ambos materiales (Al y Fe). Pero observaron que con el aumento de la conductividad, la DQO se redujo ligeramente en el caso del aluminio, y la reducción fue ligeramente mayor con electrodo de hierro. Sobre el efecto de la conductividad de las aguas residuales sobre el costo de operación, han encontrado que para ambos materiales de electrodos, dichos costes disminuyeron al aumentar la conductividad desde 1000 a 4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

### **Efecto sobre la densidad de corriente**

Han estudiado el efecto de la densidad de corriente sobre la eficiencia de eliminación de la DQO y la turbidez, utilizando electrodos de hierro y aluminio, por un tiempo de funcionamiento de 10 min. Han encontrado que en el caso del aluminio, se requiere una densidad de corriente mínima 150  $\text{A}/\text{m}^2$  para una buena eficiencia de eliminación, con una tasa de carga aproximadamente igual a 28 Faraday/ $\text{m}^3$ . En el caso de hierro, fue suficiente entre 80-100  $\text{A}/\text{m}^2$  con una tasa de carga 17 Faraday/ $\text{m}^3$ .

Para ver el efecto del tiempo de funcionamiento, han realizado la experimentación a una densidad de corriente constante de 100  $\text{A}/\text{m}^2$ . Han encontrado que con electrodo de aluminio requieren al menos 15 minutos para una buena eficiencia de eliminación, mientras que con electrodo de hierro, fueron suficientes 10 minutos. Sostienen que tanto la densidad de corriente y el tiempo de funcionamiento presentan efectos similares sobre el rendimiento del proceso y sugieren combinar las dos variables como una nueva variable que es la densidad de carga expresada en Faraday por unidad de volumen (o masa) de aguas residuales.

Concluyen que el consumo de energía es más bajo con electrodos de hierro, mientras que el consumo de electrodo es menor con aluminio.

Los cálculos de costes realizados muestran que, en el caso de electrodos de hierro, costo de operación es aproximadamente de 0,1 \$ US/kg DQO eliminado, y de aluminio fue de 0,3 \$

US/kg DQO eliminado. El costo del consumo de electrodos para el hierro fue cercano al 50% del coste total, y para el aluminio fue del 80% del coste total.

**Lai Chen L., et al., (2003), "Treatment of chemical mechanical polishing wastewater by electrocoagulation: system performances and sludge settling characteristics", Chemosphere, (artículo en prensa).**

Los autores han investigado sobre el tratamiento de agua residual procedente del acabado químico mecánico de una planta de semiconductores por electrocoagulación. Han determinado la DQO, SS, ST, pH, conductividad y turbidez.

La celda experimental de electrocoagulación consistía en electrodos en placas de aluminio y hierro de 20 cm x 3 cm x 0,1 cm, que fueron escogidos como ánodo y cátodo por sus buenos rendimientos. Los electrodos fueron situados a una distancia entre ambos de 1 cm. Tres pares de electrodos fueron adaptados en la celda electrolítica para toda la prueba experimental. La fuente de alimentación de corriente continua fue mantenido constante a 2 A, con una densidad de corriente de 93 A m<sup>-2</sup>.

Las pequeñas muestras de aguas residuales tratadas fueron tomadas periódicamente de la celda de electrocoagulación para medir los ST, SS, turbidez, DQO, y concentraciones de cobre. La prueba de electrocoagulación no fue más de 180 minutos.

Los resultados obtenidos son: una eficiencia de eliminación del 99% de cobre con un tiempo de retención entre 12 y 20 minutos, para una potencia aplicada de 30 y 20 V respectivamente. Para la turbidez trabajando a las mismas condiciones se ha reducido de 180 NTU a 2 NTU en menos de 20 minutos, la mayor reducción de la turbidez ocurrió entre 10 y 20 minutos. Utilizando una potencia de 10 V se da la mayor reducción de la turbidez con un tiempo máximo de 20 minutos.

En cuanto a la eficiencia de eliminación de la DQO, después de 30 minutos de electrocoagulación el rango fue de 76% para 10V, de 85% para 20V y 89% para 30V. Como puede observarse la remoción de la DQO, del cobre y la turbidez ocurre a 20 y 30 voltios, la intensidad de corriente registrada fue de 1,86 y 2,77 A respectivamente. Por lo tanto

concluyen que a 20V se lograron buenos resultados de eliminación de los parámetros indicados anteriormente.

En cuanto a los sólidos totales en el agua residual tratada era relativamente baja alrededor de 1,3 g/l a las condiciones de operación mencionadas anteriormente. Referente a los SS, en el agua residual inicial la concentración de los SS era muy baja, y de acuerdo a la medida de distribución de partículas han encontrado que su tamaño es mucho más pequeño que el tamaño de poro del papel de filtro utilizado para medir SS según el método el estándar.

El pH lo han mantenido constante a 7,3 durante la experimentación, acerca de la conductividad no concluyen nada.

**Holter P., et al., (1999), "Electrocoagulation as a wastewater treatment". The Third Annual Australian Environmental Engineering Research Event. 23-26 November Castlemaine, Victoria.**

Los autores sostienen que la electrocoagulación es un proceso complejo con una multitud de mecanismos que actúan sinérgicamente para eliminar los contaminantes del agua, y que la falta de un enfoque sistemático ha dado lugar a un sinnúmero de diseños para reactores de electrocoagulación sin la debida consideración de la complejidad del sistema. Consideran que es necesario un enfoque sistemático, para entender la electrocoagulación y el control de sus parámetros, con el fin de permitir que, a priori, la predicción del tratamiento de los distintos tipos de contaminantes.

En el proceso de electrocoagulación tienen gran influencia el pH, tipo y concentración del contaminante, el tamaño y posición de la burbuja, la estabilidad del flóculos formado. El mecanismo predominante puede variar a lo largo del proceso dinámico conforme progresa la reacción y con los cambios de los parámetros de operación y tipos de contaminantes.

En la electrocoagulación, la corriente pasa a través del electrodo oxidando el metal a forma de catión, simultáneamente el agua es reducida a hidrógeno gas y ion OH<sup>-</sup>. El catión hidrolizado en el agua forma un hidróxido con especies dominantes que dependen del pH de la solución.

Los cationes altamente cargados forman con cualquier partícula coloidal complejos polihidróxidos. Estos complejos tienen altas propiedades de adsorción, formando agregados con los contaminantes. El gas hidrógeno generado ayuda al mezclado y por tanto la floculación. Una vez formados los flóculos el gas hidrógeno crea el efecto de flotación y arrastra a la superficie del líquido en forma de espuma, eliminando así los contaminantes.

Hay una gran variedad de maneras en que las especies de Al o Fe pueden interactuar en la solución:

1. La migración a un electrodo cargado opuestamente (electroforesis) y la agregación debido a la carga neutralización.
2. Los cationes o iones hidroxilo (OH<sup>-</sup>) forma un precipitado con el contaminante.
3. Los cationes metálicos interactúa con los OH<sup>-</sup> para formar un hidróxido, que tiene propiedades elevadas de adsorción, por lo tanto, ayuda a la unión de los contaminantes (puente de coagulación).
4. Los hidróxidos de forman larga redes estructurales y barre a través del agua (coagulación de barrido).
5. Oxidación de contaminantes a especies menos tóxicos.
6. Eliminación por electroflotación y la adhesión a las burbuja.

Concluyen que la complejidad intrínseca del proceso hace que sea difícil su modelo y control, y que es necesario realizar un enfoque sistemático para la comprensión fundamental de la electrocoagulación.

## **2.9. En relación con el noveno objetivo. “Rendimiento de diferentes equipos de electrocoagulación, planos y tubulares”**

**Fouad Y.O.A., et al., (2009) “Performance of an electrocoagulation cell with horizontally oriented electrodes in oil separation compared to a cell with vertical electrodes”**

Los autores han realizado una investigación sobre la comparación del rendimiento de separación de aceite en una celda de electrocoagulación con electrodos orientados horizontalmente y otra celda con electrodos verticales.

La celda tenía unas dimensiones de 20 x 20 x 30 cm, el cátodo era una placa de aluminio situada en el fondo de la celda, el ánodo consistía en una serie de cilindros horizontales separados a una distancia de 0,87 cm entre sí. Cada cilindro era de 15 cm de largo por 0,8 cm de diámetro. Los cilindros estaban fijados por los extremos a 2 láminas de aluminio. La separación entre cátodo y ánodo era de 1,5 cm. Para comparar este estudio han construido una celda con electrodos de placas aluminio de 17 x 17 cm, orientadas en forma vertical y la separación entre electrodos era de 1,5 cm.

El agua residual sintética tenía una concentración de aceite de 500 mg/l, con concentraciones de NaCl de 1,5%, 3,5% y 85 ppm.

Al estudiar el efecto de la densidad de corriente, han observado que a una determinada densidad de corriente la mayor parte de los aceites se separan dentro de los primeros 10 minutos de tiempo de electrólisis, y luego el proceso de separación del aceite disminuye con el tiempo. La alta tasa de separación inicial de aceite puede atribuirse a la elevada frecuencia de colisión entre gotas de aceite neutralizadas, y conforme pasa el tiempo disminuye el número de gotas, la frecuencia de colisión y la coagulación.

Observaron además, el efecto de la temperatura sobre la variación de la concentración de aceite con el tiempo. Los datos muestran que la eliminación del aceite aumenta al disminuir la temperatura. Sostienen que puede deberse a los siguientes efectos:

1. Si se incrementa de la temperatura aumenta la tasa de electrocoagulación, a través de:
  - (a) Al incrementarse la temperatura se incrementa la difusividad del  $Al^{3+}$  como resultado de la disminución de la viscosidad de la solución, esto aumenta la eliminación del  $Al^{3+}$  de la superficie del ánodo, es decir decrece la polarización del ánodo con el consecuente incremento de la eficiencia de la corriente sobre la disolución del aluminio.
  - (b) al aumentar la temperatura aumenta el movimiento Browniano de las gotas de aceite con el consecuente aumento de la frecuencia de colisión y coalescencia de las gotas de aceite neutralizadas.

2. Por otro lado al aumentar la temperatura se incrementa la solubilidad del  $\text{Al}(\text{OH})_3$  con la consecuente disminución en la eficacia de la coagulación. Parece que, en la gama de condiciones, el segundo efecto negativo supera a los efectos descritos en (1).

Sobre la comparación de la eficacia de las celdas con electrodos horizontales y verticales, sostienen que han alcanzado eficiencias altas con electrodos horizontales que con verticales, lo cual puede ser debido a la mejor mezcla del  $\text{Al}^{3+}$  disuelto anódicamente con la emulsión como resultado de la distribución uniforme de las burbujas de  $\text{H}_2$  generadas catódicamente por toda la sección transversal. En el caso de la celda con electrodos verticales, las burbujas de  $\text{H}_2$  generados forman una cortina delgada en las inmediaciones del cátodo lejos del ánodo, la solución arrastrada por las burbujas de  $\text{H}_2$  solo es reciclado en la parte superior del ánodo disuelto, mientras que el resto del ánodo permanece sin agitar. A consecuencia de la eficiencia del mezclado y la habilidad de flotación de las burbujas de  $\text{H}_2$  en celdas con electrodos verticales es menos eficiente que en celdas con electrodos horizontales.

Por último los investigadores han encontrado que la separación de aceite por electrocoagulación se lleva a cabo a través de una ecuación cinética de primer orden especialmente en la primera etapa, donde la frecuencia de colisión de las gotas de aceite neutralizado determina la velocidad de coagulación.

**Arslan-Alaton I., et al., (2009), "Electrocoagulation of simulated reactive dyebath effluent with aluminum and stainless steel electrodes".**

En el presente documento los investigadores resumen la investigación realizada sobre el tratamiento de las aguas residuales procedentes de la industria textil mediante electrocoagulación usando electrodos de aluminio y acero inoxidable.

La unidad de electrocoagulación tenía una capacidad de 1,5 litros, equipado con 6 electrodos monopares tipo barra conectados en forma paralela con una distancia entre electrodos de 2 mm. Las dimensiones de los electrodos eran de 11,9 cm de largo x 1,2 cm de diámetro.

Realizaron 3 conjuntos de experimentos para investigar el material de electrodo y establecer las condiciones óptimas de trabajo:

- Efecto inicial del pH (3, 5, 7, 9 y 11) a una densidad de corriente fija ( $j_c = 22 \text{ mA/cm}^2$ ).
- Efecto de la densidad de corriente aplicada ( $j_c = 22 - 87 \text{ mA/cm}^2$ ) a un pH inicial de 5.
- Efecto del tipo de electrolito (NaCl y Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) a 2 diferentes pH (5 y 11) y  $j_c = 22 \text{ mA/cm}^2$ .

El agua residual fue sintética similar a las aguas del baño de tinte de la industria textil, la DQO inicial era de 305 mg/l.

Los resultados con electrodos de acero inoxidable, muestran que el pH óptimo con el cual han alcanzado una alta eliminación del color y DQO fue de un pH inicial de 5. Sostienen que la eliminación de la DQO fue prácticamente independiente de la densidad de corriente y fue rápida durante los primeros 25 minutos de electrocoagulación. Consideran que la densidad de corriente óptima podría ser 22 mA/cm<sup>2</sup> ( 5 A) aplicada, aunque la eliminación de la DQO fue ligeramente mayor con 33 mA/cm<sup>2</sup>.

En relación a los electrodos de aluminio, al evaluar el efecto del pH, han encontrado que al igual que en el caso anterior el pH tiene un efecto considerable en la cinética de decoloración y sobre la eliminación de la DQO, alcanzaron una eliminación del color y DQO en un 80 – 90% después de 5 minutos de electrocoagulación a pH 3, incrementándose ligeramente la eliminación extendiendo el tiempo a 60 minutos de electrocoagulación. Cuando el pH fue ajustado 5, la eficiencia de eliminación de la DQO fue de 76% después de 10 minutos de electrocoagulación. Observaron que la densidad de corriente no tiene efecto significativo sobre la eliminación de la DQO, ya que en los primeros 15 minutos la reducción de la DQO fue muy rápida con todas las densidades de corriente aplicadas, estabilizándose a partir de entonces. La densidad de corriente óptima a pH fue de 22 mA/cm<sup>2</sup>.

Los investigadores han determinado el consumo de energía eléctrica en términos de kWh/m<sup>3</sup> de efluente tratado, según la ecuación:

$$\frac{U \times I \times t}{V_r}$$

Energía consumida = ,

Donde U es el voltaje medido durante la reacción en voltios, I es la corriente aplicada en amperios, t es el tiempo de reacción en minutos, Vr es el volumen del reactor en litros. El consumo de energía, en condiciones óptimas usando electrodos de aluminio, fue de 1,8 kWh/m<sup>3</sup> y con electrodos de acero inoxidable fue de 3,6 kWh/m<sup>3</sup>, después de 20 – 25 minutos de electrocoagulación. La cantidad de lodo obtenido con electrodos de acero inoxidable fue mucho menor que con electrodos de aluminio.

## 2.10. En relación con el décimo objetivo. “Modelización del proceso”

**Den Walter, Chihpin Huang, (2006), “Electrocoagulation of Silica Nanoparticles in Wafer Polishing Wastewater by a Multichannel Flow Reactor: A Kinetic Study”, Journal of Environmental Engineering © ACSE 132 (12), pp 1651-1658**

Los autores han investigado sobre los estudios cinéticos que se desarrollan en un reactor monopolar utilizado para el tratamiento de aguas residuales de tratamiento de superficies de metales (galvanización mecánica-química).

Las aguas residuales de la galvanización química-mecánica (CMP) utilizada para este estudio fueron obtenidas de una gran planta de fabricación de semiconductores del Parque Industrial de Ciencia en Hsinchu, Taiwán. Las características del agua residual típicamente contenía turbidez en el rango entre 200 y 600 NTU, conductividad en el rango entre 50 y 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ., y pH entre 6,8 y 9,1. El tamaño y distribución de las partículas se midieron en un analizador de partículas Malvern. Con un rango efectivo entre 0,01  $\mu\text{m}$  y 2 mm. La movilidad de las partículas electroforeticas fue medida con un analizador de potencial zeta ( $\zeta$ ), usando un análisis Doppler con luz de dispersión láser. Han obtenido un conjunto representativo de la distribución del tamaño de las partículas, así como del potencial  $\zeta$ . El tamaño de las partículas estrictamente distribuidos entre 50 y 350 nm, con una media geométrica de 114 nm. El punto isoeléctrico (PIE) de las aguas residuales es de aproximadamente 2,7, resultando una media de tamaño de



las partículas de más de 2  $\mu\text{m}$ . Además, el tamaño de las partículas parecen estabilizar ( $\approx 150$  nm) a pH superiores a 4, sugiriendo que la energía de colisión de las partículas fue suficiente para superar la fuerza eléctrica repulsiva del potencial zeta  $\zeta$  de menos de -20 mV, conduciendo a la aglomeración de partículas de tamaño y rápido crecimiento. Además de la turbidez, la concentración total de sílice en las aguas residuales también fue analizada por espectrometría de emisión atómica con un plasma de acoplamiento inductivo (ICP-AES). Las aguas residuales de la PCM suelen contener una concentración de sílice entre 400 y 800 mg/L, el cual podría corresponder a una fracción volumétrica de 0,4-0,7 de sólidos totales, asumiendo una densidad de sílice de 2,1 g/ml. Observaron que la sílice en suspensión fue predominante en aguas residuales de la PCM. No obstante, la concentración de sílice y la turbidez formada tiene un buen comportamiento lineal entre el rango de las concentraciones observadas en este estudio, y, por tanto, la turbidez fue empleado como el principal parámetro de monitoreo.

### ***Métodos Experimentales***

Utilizaron reactores a escala de laboratorio de 8 litros y a escala piloto de 180 litros, utilizando corriente continua. Los reactores de las dos escalas eran similares geoméricamente con respecto a la proporción entre el largo, ancho y altura. Además, el área efectiva de cada electrodo de la placa que canaliza el reactor fue de 180 mm x 140 mm para la escala de laboratorio y de 450 mm x 400 mm para la escala experimental. Los ánodos (placas de hierro) fueron completamente sumergidos, y los cátodos (placas de acero inoxidable) fueron parcialmente sumergidos en la suspensión. Las placas de electrodos fueron interpuestas equidistantemente para crear canales de flujo vertical con campos eléctricos uniformes. El ancho del canal puede ser modificado con la adición o eliminación de un número igual de placas de electrodos.

La densidad de carga aplicada al agua residual fue calculada utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad de carga CF} = iT/F V_r \quad (1)$$

Por lo tanto, la densidad de carga resultante fue de  $\sim 20$  F/m<sup>3</sup> y la densidad de corriente de 7 A/m<sup>2</sup>, y fueron similares entre los dos reactores.

Las muestras tanto afluentes como efluentes fueron tomadas en intervalos de 5 minutos y se midieron la turbidez, conductividad y pH.

La eficiencia de la corriente ( $\epsilon c$ ) fue definida como el cociente entre la masa real de hierro ([Fe]R) y la masa teórica del hierro liberado de ánodos ([Fe]T) , donde la masa teórica de hierro liberada fue calculada por la ley de Faraday para un sistema monopolar.

$$\epsilon c = [Fe]R/[Fe]T \quad (2)$$

$$[Fe]_T = \frac{i \times \tau \times MW_{Fe}}{Z \times F} \quad (3)$$

### Desarrollo de los procesos cinéticos y planteamiento del diseño

El principal objetivo de los investigadores ha sido determinar la cinética del proceso de electrocoagulación en un reactor de flujo continuo con configuración monopolar. Para condiciones cinéticamente limitadas por la velocidad de coagulación de las partículas, el flujo continuo en los canales puede ser esencialmente visto como una sola placa de canales paralelos que siguen un modelo de axial.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \mathfrak{R} \quad (4)$$

Donde  $\mathfrak{R}$  representa la reacción cinética asociada a la eliminación de partículas debido a la coagulación.

Las condiciones iniciales y de contorno para el sistema abierto son:

$$C(x,t = 0) = 0; c(x=0,t) = c_{in}$$

$$D \left. \frac{dc}{dx} \right|_{x=L-} = 0$$

Para partículas ultra finas, el movimiento browniano es el mecanismo principal en la interacción de partículas, y la cinética de coagulación basada en el análisis de la dinámica de

las partículas discretas que da lugar a una reacción de segundo orden  $\mathfrak{R} = dc/dt = -kc^2$ . La ecuación (4) se completó de la siguiente forma:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - kc^2 \quad (5)$$

La difusión de partículas puede ser calculada por la ecuación de Einstein - Stoke para regímenes laminares bajos.

$$D = \frac{k_B T}{3\pi\mu d_p} \quad (6)$$

Debido a que la difusividad de la partícula es muy pequeña ( $D \approx 10\text{-}12\text{m}^2/\text{s}$ ), la ecuación (5) puede ser despreciada. Finalmente la ecuación puede ser simplificada a una ecuación diferencial de primer orden, asumiendo condiciones de estado estacionario.

$$v \frac{\partial c}{\partial x} + kc^2 = 0 \quad (7)$$

Cuya solución analítica es:

$$c(x) = \left( \frac{k}{v}x + \frac{1}{c_0} \right)^{-1} \quad (8)$$

Usaron la ecuación final para determinar la constante cinética real del reactor de electrocoagulación que mejor se adaptó a la experimentación.

Los investigadores han propuesto en este estudio un diseño apropiado consistente en la evaluación experimental y el modelo de simulación, que puede servir como un instrumento eficaz para la evaluación a priori del proceso de electrocoagulación. Dado que el modelo descrito anteriormente excluye la generación de iones ferrosos como un tipo de factor limitante, el procedimiento del diseño requiere una evaluación experimental inicial de los parámetros de funcionamiento.

En este estudio, los parámetros de optimización fueron la carga y densidad de corriente que se llevaron a cabo mediante una serie de estudios rigurosos a escala de laboratorio, seguido de la determinación experimental de la constante de velocidad de coagulación bajo las condiciones de funcionamiento mencionadas anteriormente. Posteriormente, la "optimización" de los rangos de estos parámetros de la escala de laboratorio fueron aplicados a la escala piloto.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### ***Efecto de carga***

La carga es generalmente considerada como una base técnica para evaluar el rango de condiciones de funcionamiento necesarias para alcanzar la eficiencia deseada. Este parámetro sustituye del tiempo de retención hidráulico y de la corriente aplicada, el cual es teóricamente proporcional a la cantidad de iones ferrosos liberados para la electrocoagulación de acuerdo con la ley de Faraday. La figura muestra los efectos de la carga en estado de equilibrio, la eficiencia de turbidez de los experimentos a escala de laboratorio. El tiempo en el cual las condiciones del estado de equilibrio (es decir, la turbidez residual no cambia con el tiempo) se han alcanzado después de 60 minutos de funcionamiento. Los datos indican un fuerte aumento de la eficiencia de remoción de con cargas de hasta 8 F/m<sup>3</sup>, por encima de éste la eficiencia de remoción de la turbidez comenzó a descender.

Obviamente, en condiciones de baja carga, donde las cargas se aplican a las aguas residuales, la cantidad de iones ferrosos como agente coagulante fue insuficiente para la eliminación eficaz de las partículas de sílice. Para cargas mayores que 8 F/m<sup>3</sup>, la remoción de turbidez fue mayormente controlada por la velocidad de coagulación y aglomeración de partículas, cinéticamente como un proceso mucho más lento que el proceso de desestabilización coloidal. Además, la sobre dosificación de coagulantes daría lugar a la reestabilización de partículas y turbidez.

### ***Efectos de la densidad de corriente***

En el proceso de electrocoagulación, la eficiencia real de la corriente es muy específica del material del reactor, lo que requiere una evaluación básica antes de su aplicación para la

eliminación de partículas. Los autores sostienen que la concentración total de hierro inicialmente se incrementó con el aumento de la densidad de corriente, y luego se estabilizó y fluctuó entre 3,7 y 5,0 mg/l para densidades de corriente superior a 2,8 A/m<sup>2</sup>. En general, la eficiencia real parece ser relativamente baja (40%), y disminuyó continuamente con una mayor densidad de corriente a aproximadamente al 10%. La baja eficiencia probablemente está relacionada con la textura de la superficie y el contenido de impurezas (por ejemplo, grafito, silicio) en la fundición de los ánodos de hierro (Lescuras – Darrou, et al., 2002). El desarrollo de una película de óxido, que no se disuelve fácilmente en soluciones básicas, aumenta la resistividad del metal y da lugar a un desperdicio de energía. El metal puede ser expuesto sólo en algunos puntos localizados, debido a la discontinuidad en el metal (por ejemplo, defectos o granos). Sin embargo, cuando se incrementó la densidad de corriente a 7,1 A/m<sup>2</sup>, la eficacia real, así como la correspondiente concentración de hierro comenzó a incrementar, lo que sugiere que una densidad de corriente crítica conduce a la ruptura de la película de óxido.

Los investigadores han extraído como conclusión que los valores reales de concentración de hierro determinados en un estudio batch no debería ser usado para estimar la concentración de hierro en efluentes de flujos continuos, no sirve como un factor de optimización de los parámetros de funcionamiento.

Aunque la carga ofrece un parámetro útil para el diseño del proceso de electrocoagulación, este tiende a pasar por alto los distintos parámetros como la densidad de corriente y el tiempo de retención de aguas residuales. Por lo tanto, la evaluación de los efectos de estos parámetros por separado es imprescindible. Han encontrado que cuando la densidad de corriente era inferior a 1,5 A/m<sup>2</sup>, en ninguna de las corridas experimentales dio una eficiencia de eliminación de la turbidez superior al 50%, mientras que la concentración de hierro residual era muy baja. Estos resultados implicaron que la eliminación de sílice fue principalmente limitado por la disponibilidad de los iones ferrosos liberado de la superficie anódica.

Cuando la densidad de la corriente se vio incrementada, la eficiencia de remoción la turbidez para todos los tiempos de retención fueron invariablemente mayores debido a la mayor cantidad de disolución de hierro. Cabe destacar la aceleración de migración de partículas hacia superficies anódicas debido al fuerte campo eléctrico, ya que el tiempo de migración de partículas es por lo menos dos órdenes de magnitud menor que el tiempo de retención hidráulica experimentado en este estudio. Observaron que la eficiencia de remoción de la

turbidez con un tiempo de retención de 30 minutos se incremento con bastante lentitud con una densidad de corriente de hasta 4,3 A/m<sup>2</sup>, y luego aceleró con una densidad de corriente más amplia. Además, la concentración del hierro residual en el efluente para t = 30 minutos aumentó considerablemente con una densidad de corriente superior a 2,9 A/m<sup>2</sup>, llegando a un máximo de 4,5 A/m<sup>2</sup>. La acumulación de la concentración total de hierro sugiere que el proceso sea controlado inicialmente por la velocidad de coagulación en vez de por la disponibilidad de los iones ferrosos. Sin embargo, la posterior reducción de la concentración de hierro residual con grandes densidades de corriente entraña otros mecanismos que intensifican el consumo (es decir, las partículas de coagulación) de los iones ferrosos.

La concentración de hierro residual correspondiente demostró también la acumulación de coagulantes a lo largo de las densidades de corriente, no obstante la medida de sus acumulaciones fueron mucho menores que en el caso de t = 30 minutos. En principio, la cantidad de hierro residual para todas las corridas experimentales reflejó de manera importante la eficiencia de remoción de turbidez.

### ***Efectos del pH inicial de las aguas residuales***

Durante los procesos de electrocoagulación, los efectos de pH de las aguas residuales son principalmente de dos tipos: el grado de la carga superficial y la especiación del coagulante formada bajo el pH. Para ánodos de hierro, iones ferrosos [Fe(II)] es el producto común de la electrólisis de hierro. El Fe(II) puede ser fácilmente oxidado a Fe(III) en forma de partículas de Fe(OH)<sub>3</sub>, especialmente en condiciones neutras o alcalinas. Los gases de oxígeno e hidrógeno son desarrollados en las partes anódicas y catódicas para completar las reacciones redox.

Observaron que en condiciones ácidas fuertes (pH 2), no hubo eliminación de la turbidez, atribuido a la cercanía del punto isoeléctrico (IEP), donde las partículas de sílice, no sufrieron cambios, minimizando así la posibilidad de migración de partículas y neutralización de la carga con iones ferrosos. Para pH superiores a 6, de la eficiencia de eliminación de turbidez generalmente excedió el 80% con menores concentraciones residuales de hierro, lo que indica que la carga superficial ya no es el factor limitante. Por otro lado, la eliminación de turbidez fue menos eficiente a pH 6 que en casos cuando estaban por encima de pH 7, a pesar de que las especies hidrolíticas primarias son cargadas positivamente (p.e., Fe(OH)<sup>+</sup>, Fe(OH)<sub>2</sub><sup>+</sup>) bajo

condiciones ácidas débiles, frente a la carga negativa de especies (p.e.,  $\text{Fe}(\text{OH})_4$ ) bajo condiciones alcalinas. Por lo tanto, los iones ferrosos, parecen ser el principal agente coagulante vinculante a los coloides de sílice cercanos a la superficie de los ánodos. Basados en estos resultados, no fue necesario realizar ajuste del pH a las aguas residuales utilizadas en el experimento, ya que normalmente tenía un pH de entre 8 y 9. Además, para las aguas residuales con el pH inicial  $\geq 6$ , el efluente final del pH total incremento de 10,5-11,2, sugiriendo que la reacción de hidrógeno en los cátodos fue dominante sobre el  $\text{H}^+$  generadas en las reacciones.

### ***Determinación de la Constante de Reacción Cinética***

Los investigadores, sugieren que la eficiencia de eliminación de turbidez por encima del 90% con bajas concentraciones de hierro residual consiguió cuando la densidad de corriente fue mayor a 5,7 A/m<sup>2</sup> y el tiempo de retención fue más de 60 minutos. Estas condiciones de operación correspondieron a cargas mayores a 9,6 F/m<sup>3</sup>. Consecuentemente, por eliminación de la disponibilidad  $\text{Fe}(\text{II})$  como factor limitante, estos parámetros fueron seleccionados como el criterio mínimo la evaluación de los parámetros de la cinética de reacción de la coagulación. Parámetro cinético, por linearización de la Eq. (8) se tiene la Eq. (11), la constante cinética puede ser estimada entre la concentración en el estado de equilibrio y la posición de canal.

$$\frac{c_0}{c} = \frac{kc_0}{v}x + 1 \quad (11)$$

En su trabajo los investigadores muestran los perfiles de los datos experimentales y de las correspondientes curvas de regresión lineal obtenidos de la escala de laboratorio en tres diferentes condiciones de funcionamiento (es decir, el promedio de la velocidad de flujo, el número de canales y la turbidez inicial) que cumplan los requisitos señalados. Desde el número inicial de concentración de partículas de sílice (entre  $0,5 \times 10^{18}$  y  $1,5 \times 10^{18}$  l/m<sup>3</sup>) y la velocidad de flujo son valores conocidos, la constante cinética (k) podría ser fácilmente determinada a partir de la pendiente ( $k c_0 / v$ ) de cada curva de regresión lineal. Como resultado de ello, la tasa promedio de la constante de segundo fue de  $1,2 \times 10^{-21}$  m<sup>3</sup>/s. Cabe destacar que la rápida coagulación de las partículas sub-micrométricas con similar tamaño sigue la teoría cinética de coagulación browniana, cuya tasa constante está determinada por la frecuencia de colisión para  $k = 4k_B T / 3\mu$ . Este cálculo resulta en un valor de k del orden de  $10^{-18}$  m<sup>3</sup>/s, lo que habría

sobreestimado significativamente la tasa de coagulación para este proceso de electrocoagulación. Se ha documentado que la diferencia de tamaño entre los coloides coagulantes podría reducir la eficiencia de colisión por interacción de energía o de otra barrera hidrodinámica desconocida en el caso de la teoría de la coagulación [Han y Lawler 1992] Por lo tanto, la determinación experimental de parámetros cinéticos se considera necesario para el diseño de reactores de electrocoagulación, en particular para los relacionados con el tratamiento de suspensión acuosa que contiene componentes desconocidos.

### ***Verificación y Simulación de Escala Piloto***

Los estudios de escala piloto de electrocoagulación fueron conducidos a evaluar la eficiencia de eliminación de turbidez para las aguas residuales de la CMP, y para validar el modelo cinético descrito en la Eq. (4). El reactor de escala piloto fue sometido a diferentes condiciones de funcionamiento. El rango de condiciones de funcionamiento dio como rendimiento de carga entre 5,0 y 10,4 F/m<sup>3</sup> y densidad de corriente entre 4,4 y 7,3 A/m<sup>2</sup>.

Los resultados del estudio de escala piloto generalmente se ajustaban a los de la escala de laboratorio, requiriendo una carga superior a unos 8 F/m<sup>3</sup> para alcanzar la eliminación de turbidez eficiente al 90%. Una excepción ocurrió en la carga de 10,4 F/m<sup>3</sup> por debajo del cual se observó una eficiencia del 60%. Para este punto particular, la densidad de corriente de funcionamiento fue de aproximadamente 14 A/m<sup>2</sup> ( $i = 25$  A con 10 canales), el cual excedió el rango de densidad de corriente probada durante los experimentos a escala de laboratorio. Como resultado, el efluente apareció gravemente verdoso debido a la acumulación de iones ferrosos, lo que probablemente contribuyó al incremento de la turbidez del efluente. Por lo tanto, la corriente aplicada se mantuvo muy por debajo de este valor para el estudio del modelo de validación de la escala piloto.

Observaron que la tendencia del perfil de datos para cada condición experimental fue correctamente representada por el modelo de simulación, a pesar de que las discrepancias locales entre los perfiles experimentales y los modelos fueron significativas cerca de la entrada del reactor. Una parte de estas discrepancias podrían ser atribuidas al hecho de que la electrocoagulación se activa sólo en la región de superposición entre cada par de electrodos,



así como en la abertura de cada celda que forma un canal de flujo incompleto. No obstante, la discrepancia tiende a disminuir hacia la última parte del reactor.

El modelo fue validado por una serie de experimentos a escala piloto usando diferentes números de ánodos (y de este modo, los canales de flujo) con idénticos espacios entre electrodos, dando como resultando una variación en el volumen del reactor, proporcional al número de canales. La eficiencia de eliminación de turbidez de las aguas residuales en función del número de canales de flujo, lo han expresado como la longitud total de la superficie anódica disponible para la electrocoagulación. Con el suministro de una corriente continua ( $i = 20$  A), estas condiciones de funcionamiento representó una carga de  $8,3$  F/m<sup>3</sup> y un rango de densidad de corriente entre  $5,6$  y  $11$  A/m<sup>2</sup>. Evidentemente, el modelo de perfil concuerda razonablemente bien con los datos experimentales, aunque la eficiencia de eliminación prevista para menos de diez canales no ha sido verificada experimentalmente. En resumen, estos estudios de validación manifestaron la idoneidad del modelo de transporte cinético para el diseño de los canales de flujo del proceso de electrocoagulación. Cabe destacar que, aunque las relaciones cinéticas derivan de ecuaciones de transporte de reacción, éstas fueron verificadas usando la configuración de electrodos se han descrito anteriormente, que puede ser aplicable para las diferentes geometrías de electrodos a medida que la mayor parte del flujo formado como canales de placas paralelas tengan similar comportamiento hidrodinámico (p.e., suficiente anchura (W) y altura (H)). Sin embargo, electrocoagulación con reactor o electrodos de geometrías significativamente diferentes a las que se usaron los autores (p.e., cilindros concéntricos, lecho compacto) está más allá del alcance de este estudio.

**Khemis M., et al., (2006), "Treatment of industrial liquid wastes by electrocoagulation: Experimental investigations and an overall interpretation model.**

En este trabajo los investigadores presentan los resultados de los estudios experimentales del tratamiento de residuos líquidos concentrados por electrocoagulación usando electrodos de placas paralelas de aluminio (Al). Las pruebas fueron realizadas en una celda electroquímica con recirculación para varios residuos industriales. El espacio entre electrodos fue de  $20$  mm, la velocidad del flujo en la celda fue de  $6,2$  cm<sup>3</sup>/s. La temperatura se controló a  $20^{\circ}\text{C}$ . El gas generado en la superficie de los electrodos se recolectó en recipiente graduado que actuaba como gasómetro. El pH inicial fue de  $6,5$ .

La técnica demostró una disminución eficiente de las suspensiones con concentraciones de Al disuelto en el rango de 150 a 500 mg/l.

La generación de hidrógeno y la disolución del Al ocurrió con rendimientos de corriente cercanos a la unidad. Además, el tiempo de variación de la DQO dependía en gran parte de la naturaleza del residuo tratado: mientras que el tratamiento siguió con regularidad para las suspensiones de látex, la disminución de la DQO para suspensiones con aceite y sílice comenzó solamente después de la acumulación suficiente de especies de Al (III).

Los autores han propuesto un modelo fenomenológico para el pronóstico de la disminución de los residuos en términos de la DQO por complejación en la materia suspendida por Al (III), y tener en cuenta el período de "Latencia" y observar experimentalmente. Los valores de los parámetros involucrados son discutidos en relación con la suspensión tratada.

Los residuos líquidos usados en la investigación fueron:

- Suspensiones de aceite, que era una mezcla de aceite mineral refinado, glicol éter, amina y alcanos clorados.
- Emulsión de látex, consistía en una dispersión acuosa de acrilonitrilo, copolímero de 1-3 butadieno.
- Emulsión inorgánica conteniendo sílice

### **Modelo para el tratamiento de los desechos por electrocoagulación**

#### ***Desarrollo del Modelo***

El modelo desarrollado para la representación de los perfiles de la demanda química de oxígeno (COD), se basó en los siguientes supuestos:

1. El tratamiento de suspensiones por electrocoagulación se produce sólo para las concentraciones de coagulante, CAI, en el umbral  $C_{min}$ , como se observó experimentalmente. La concentración de sales activas de Al es igual a la diferencia  $(CAI - C_{min})$ . El tiempo  $t_{min}$  fue definido como el tiempo en el cual  $CAI = C_{min}$ . Con independencia de esta hipótesis, la concentración de CAI medido por el análisis de las

---

Procesos avanzados de tratamiento y depuración de las aguas mediante electrocoagulación

fracciones de las muestras, de ecuaciones anteriores descritas en el presente trabajo [Khemis et al., 2006] se deduce:

$$C_{Al}(t) = \frac{M_{Al} I \int_0^t \Phi_{Al} dt}{z_{Al} F V}$$

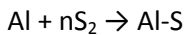
2. La materia orgánica o mineral contenida en las suspensiones lo expresaron en el modelo en términos de niveles de DQO, SS y consideraron la suma de tres contribuciones: [S1] representa la cantidad de materia suspendida que puede ser eliminada por el cambio de pH efectuado antes del análisis; [S2] expresa la concentración de la materia, la cual puede ser tratada con electrocoagulación después de la adición de coagulante; [S3] corresponde a la cantidad de materia que no puede ser tratada por la técnica electroquímica. Las concentraciones [S1], [S2], y [S3] fueron expresadas en mg de O<sub>2</sub> por litro. Sólo las concentraciones de [S1] y [S2] variaron con el tiempo.

El nivel intrínseco de la DQO en la suspensión investigada, [S0], fue escrito como:

$$[S0] = [S1] + [S2, t=0] + [S3]$$

Los valores de [S1] y [S3] fueron extraídas de la variación experimental de la DQO

3. Proceso de electrocoagulación por complejación de la materia suspendida por Al (III): el equilibrio químico postulado fue:



Donde n es un coeficiente global, expresado en mg de Al (III)/ mg O<sub>2</sub>. Porque la dimensión de n en la fórmula, no puede ser considerada como un verdadero proceso químico, sino simplemente como una descripción fenomenológica de la materia suspendida por especies de Al. El subíndice 2 se mencionó anteriormente, ya que sólo la fracción [S2] pudo ser tratada sobre disolución de Al. Al-S corresponde a las partículas complejas, propensas a la floculación

por su bajo potencial Zeta, en aras de sencillez el coeficiente  $n$  no aparece en la fórmula compleja. La constante de equilibrio total  $K$ , fue definido como:

$$K = \frac{C_{Al-S}}{[Al][S_2]} = \frac{C_{Al-S}}{C_{Al,free}[S_2]}$$

Donde  $C_{Al,free}$  es la concentración libre de especies de Al,  $C_{Al-S}$ , la concentración de Al en su forma compleja. Los investigadores realizan el siguiente balance de masas.

Para  $t > t_{min}$  el balance de masas en Al disuelto da lugar a:

$$C_{Al} = C_{min} + C_{Al,free} + C_{Al-S}$$

Además, realizan un balance de masa sobre la materia suspendida, tratada por electrocoagulación, vinculan las variables mencionadas anteriormente y realizan un reordenamiento de las ecuaciones. Finalmente deducen una ecuación del rendimiento de la reducción de la DQO de manera sencilla:

$$X = \frac{[S_0] - [S_1] - [S_2]}{[S_0]}$$

### **Resultados**

Las variaciones experimentales de  $X$  fueron trazadas frente a  $C_{Al}$ . Los parámetros del modelo  $n$ ,  $K$  y  $C_{min}$  fueron obtenidos para mejorar el ajuste de los datos para cada valor de concentración de la dispersión considerada, y las diversas corrientes aplicadas. Simulaciones preliminares mostraron que el parámetro  $K$  fue poco dependiente sobre la concentración de dispersión, como se esperaba. Por ello, es el preferido para la fijación definitiva de  $K$  con un valor medio para todas las concentraciones tratadas, y los valores obtenidos representan características fisicoquímicas de las disoluciones tratadas. La exactitud en la determinación de los parámetros fue evaluado por simulación alrededor del punto óptimo: se encontró en el 10% los parámetros  $n$  y  $K$ ;  $C_{min}$  fue calculado dentro de 10 mg l<sup>-1</sup> para todas las suspensiones, excepto para suspensiones concentradas de sílice catiónico, para el cual el intervalo de confianza alcanzado fue de 20-30 mg l<sup>-1</sup>.

Los autores sostienen que, los datos experimentales están bien representados por el modelo, a pesar de la dispersión notable con suspensiones concentrada de sílice. El pronóstico de los valores de  $C_{min}$  fueron perfectamente consistentes con los observados experimentalmente. La constante de equilibrio  $K$  era muy inferior a la unidad, cerca de  $5 \times 10^{-4} \text{ l mg}^{-1}$  para las dispersiones orgánicas, y alrededor de  $6 \times 10^{-3} \text{ l mg}^{-1}$  para sílice. El orden de magnitud de  $K$  fue discutido en relación al nivel de la DQO: como cuestión de hecho, el índice de concentración sobre las especies de Al libre  $CAI-S/CAI-free$  es igual al producto ( $K[S_2]$ ). Aunque a lo largo del tratamiento, la concentración  $[S_2]$  fue del orden de magnitud del nivel de la DQO inicial. Para  $[S_2]$  igual a 105,  $5 \times 10^4$ , y 500 mg/l, para aceite, látex y suspensión de sílice respectivamente, los valores correspondientes del producto ( $K[S_2]$ ) alcanzó 50, 25 y 4. Estas estimaciones muestran claramente que, en el curso del proceso de electrocoagulación, el Al disuelto estuvo principalmente en la forma de un complejo con la materia suspendida, en particular, para las dos suspensiones orgánicas.

Además,  $n$  fue del orden de  $10^{-3} \text{ mg Al (III) / mg O}_2$  para las suspensiones orgánicas, que expresa la alta eficiencia de las especies de Al (III) en la reducción de la DQO, desde  $200 \text{ g l}^{-1}$  – p.e., casi  $40 \text{ g l}^{-1}$  COT - pueden ser tratadas con algunas disoluciones de Al  $10^{-1} \text{ g/l}$ . El coeficiente  $n$  es muy inferior a la del la sílice: los valores de DQO para suspensiones inorgánica son poco significativas, y la eficiencia de la técnica debe ser discutido mejor en términos de reducción de la turbidez o materia suspendida.

**Cañizares P., et al., (2007), “Modelling of wastewater electrocoagulation processes. Part I. General description and application to kaolin-polluted wastewaters”.**

Los investigadores han desarrollado y evaluado un modelo matemático del proceso de electrocoagulación. Con datos experimentales obtenidos durante el tratamiento de suspensiones de caolín. El modelo determina la concentración de las diferentes especies de aluminio en función de la concentración de aluminio y del pH, y luego clasifican las especies reales totales, en algunas especies el modelo está en función de su reactividad con el contaminante contenido en el agua residual. Los procesos reactivos que involucran especies de coagulante y contaminante son asumidos para desarrollar los modelos mediante los enfoques de pseudoequilibrio. En el caso de la electrocoagulación de las suspensiones de caolín, asumieron dos procesos, primero: la neutralización de la carga de las partículas de caolín (por

la adsorción de cationes o por precipitación de hidróxidos de aluminio cargados con partículas de caolín) y segundo, el engrosamiento de las partículas dentro de un precipitado en crecimiento. Han logrado buena reproductibilidad de los datos experimentales ( $r^2 = 0.92$ ) con un número pequeño de parámetros, la mayoría de ellos tienen un valor constante y ello respalda la robustez del modelo propuesto y valida las suposiciones hechas.

El modelo matemático fue usado para reproducir el proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con caolín, como ejemplo de un residuo coloidal. Realizaron una serie de suposiciones que se detallan en [Cañizares et al., 2007].

El caolín contenido en la suspensión fue expresado en el modelo en términos de la turbidez como sigue:

- T0 representa la turbidez total del residuo.
- T1 corresponde a la turbidez refractaria, es decir la que no puede ser eliminada por la electrocoagulación.
- T2 turbidez estándar que es eliminada por neutralización de carga con Al.
- T3 denota la turbidez que es eliminada por el engrosamiento del caolín.
- T4 expresa la turbidez remanente que puede ser eliminado pero que no lo es bajo ciertas condiciones.
- T5 representa la turbidez que es eliminada por neutralización de carga del caolín por adsorción de protones.
- T6 es la turbidez que es eliminada por sedimentación del caolín sin adición de algún aluminio bajo condiciones de todo pH.

La turbidez fue medida en NTU, para cada tipo de turbidez realizaron una ecuación, dando como resultado la siguientes ecuaciones

$$T_4 = \frac{T_0 - T_1 - m \cdot (Al_1 - Al_{1min}) - T_6}{1 + K_1 \cdot Al_3 + K_2 \cdot [H^+]}$$

$$Al_3 = \frac{Al_0 - Al_1 - Al_2}{1 + \frac{K_1 \cdot T_4}{n}}$$

Finalmente la turbidez remanente lo han expresado de la siguiente forma:

$$Tr = T1 + T4$$

### Conclusiones

El proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales puede ser fácilmente modelado usando un modelo para consideraciones macroscópicas y un comportamiento fluidodinámico (idealizar la celda como un reactor de flujo perfectamente mezclado).

Consideraron cinco especies de aluminio, calculado de la concentración del aluminio total y del pH. El modelo encontrado considera que las interacciones entre contaminante y especies coagulantes son muy rápido y que pueden ser expresados mediante las ecuaciones de pseudoequilibrio.

Los mecanismos que sigue el modelo propuesto fue: (i) la neutralización de carga del caolín por la adsorción a cationes aluminio y protones, (ii) la neutralización de carga de por precipitación (por bajas concentraciones de aluminio) y (iii) el engranamiento de las partículas de caolín dentro del precipitado en crecimiento (para concentraciones de aluminio altas y valores de pH de cerca de la neutralidad). El modelo desarrollado permitió que los resultados experimentales sean reproducibles con un coeficiente de regresión de 0.92 ( $r^2$ ).

Todos de los parámetros propuestos han tenido un valor único, excepto  $n$  (coeficiente de neutralización global), el cual depende linealmente de la concentración de aluminio precipitada.

**Cañizares P., et al., (2007), "Modelling of wastewater electrocoagulation processes. Part II. Application to dye-polluted wastewaters and oil in water emulsions"**

Los investigadores han propuesto un modelo matemático descrito en el artículo anterior por los mismos autores, aplicable al proceso de electrocoagulación. Con el fin de simular el tratamiento de residuos contaminados con las soluciones de NET (negro de Eriocromo T) y la desintegración de una emulsión de aceite / agua.

Las reacciones consideradas describen la interacción entre las diferentes especies de aluminio y el contaminante. El modelo propuesto fue en base al comportamiento experimental del sistema mediante un enfoque de pseudoequilibrio. Para el tratamiento de la solución de NET, el mecanismo principal considerado fue el engrosamiento del NET en un precipitado de hidróxido de aluminio en crecimiento y la neutralización de carga de las moléculas de NET. Para la desintegración de emulsiones de aceite/agua, la adhesión de más de una gotita a la vez que una partícula de aluminio precipita explica el proceso global.

Los autores dicen que, en ambos casos, los valores de los parámetros del modelo pueden ser fácilmente relacionados con las condiciones experimentales y han obtenido buena concordancia entre los resultados experimentales y el modelado, con coeficientes de regresión ( $r^2$ ) global de 0.96 y 0.92 para el tratamiento disoluciones de NET y emulsiones de aceite/agua respectivamente.

Para el tratamiento de aguas residuales contaminado con NET (modelo para residuos colorantes), la asunción específica que han considerado son los siguientes:

El principal mecanismo de coagulación [Duan J., et al., (2003); Cañizares P., et al., (2006)] que puede explicar la electrocoagulación de NET con aluminio son: (i) neutralización de los grupos de moléculas ionizadas de NET por vinculación de los grupos de las especies de aluminio cargados positivamente, (ii) la adsorción o engranamiento de las moléculas orgánicas dentro del precipitado de aluminio en crecimiento.

Las moléculas de NET experimentan ionización de varios grupos funcionales en agua y el nivel depende del pH. Así, en solución acuosa el NET puede estar en 3 formas diferentes:



1. NET-H2, en el cual solo el grupo  $\text{SO}_3^-$  es ionizado
2. NET-H1, los grupos  $\text{SO}_3^-$ , y  $\text{OH}^-$  son ionizados
3. NET-H0, donde el grupo  $\text{SO}_3^-$  y dos grupos  $\text{OH}^-$  son ionizados

Los investigadores, en anteriores estudios, han encontrado que es posible eliminar el NET a valores de pH por debajo de 6 con el proceso de electrocoagulación.

Han realizado una serie de ecuaciones de los mecanismos tanto de neutralización y adsorción del NET.

Las suposiciones realizadas para los distintos tipos de contaminantes y reacciones de emulsión de aceite – agua son las siguientes:

El principal mecanismo para la desestabilización de emulsiones aceite – agua es la adhesión de más de una gotita al tiempo que precipita la partícula de hidróxido de aluminio (cargado positivamente) y la posterior coalescencia de las fases.

El contenido de aceite en la emulsión lo han expresado en términos de la DQO, de la siguiente manera:

1.  $C_0$ , representa la DQO total de la emulsión.
2.  $C_1$ , corresponde a la DQO refractaria, es decir que no es removida por la electro-desestabilización.
3.  $C_2$ , denota la cantidad de DQO, que es eliminada por adhesión o adsorción de las gotitas de aceite a partículas del precipitado, bajo ciertas condiciones de operación.
4.  $C_3$ , representa la DQO remanente, es decir la cantidad de aceite que puede ser eliminada pero no lo es, bajo ciertas condiciones de operación.

## Resultados y discusiones

### Modelo para la electrocoagulación de aguas residuales contaminadas con tintura

De manera resumida, los investigadores han considerado varias especies del NET para el modelo, como son los valores de NEO (es la concentración total del NET), y NEe (cantidad de NET eliminada).

El modelo matemático que han propuesto reproduce la electrocoagulación del agua residual contaminada con NET, los parámetros del modelo considerados han sido: k, m, Al<sub>1</sub>min. Que fueron estimados por la variación del NET eliminada (NEe) en el proceso como función del pH.

Otro parámetro considerado por los autores ha sido n (mg NET dm<sup>-3</sup>/mg Al dm<sup>-3</sup>), que representa el coeficiente global de la neutralización de las moléculas de NET con los cationes de aluminio e indica la cantidad de NET con un grupo de SO<sub>3</sub><sup>-</sup> ionizado que puede ser eliminado por el mecanismo de coagulación con aluminio.

El parámetro C<sub>n</sub> (carga neta, mol/dm<sup>3</sup>) consistió en la suma de las cargas netas de cada especie iónica presente en el sistema, y su valor óptimo se llamó C<sub>n opt</sub>.

$$C_n = 3 \cdot [Al^{3+}] + 2 \cdot [AlOH^{2+}] + [Al(OH)_2^+] + [H^+] - [Al(OH)_4^-] - [OH^-]$$

Por otra parte n lo han determinado de la siguiente manera:

$$n = -0.871 \cdot \ln |C_n - C_{n\text{opt}}| + 3.472$$

Sostienen que en todos los casos el modelo se ajusta a los datos experimentales, validando las suposiciones en el cual se basó el modelo. Finalmente la comparación realizada de la eliminación del NET experimental y modelada para los diferentes experimentos ha mostrado un coeficiente de regresión (r<sup>2</sup>) de 0,96.

### Modelo para la electrocoagulación de emulsiones de aceite-agua

Para la modelación de la electrocoagulación de emulsión de aceite-agua, los investigadores han tomado como parámetro la DQO representada como C0 (DQO total), Cr (DQO remanente) que fueron medidos experimentalmente en cada caso.

Con el modelo desarrollado han simulado la electrodesestabilización de la emulsión con electrodos de aluminio, tomando como otro parámetro para el modelo Al<sub>1min</sub>, que es la concentración del aluminio precipitante necesario para la desestabilización de la emulsión. El valor para este parámetro fue estimado por la variación experimental de Cr (DQO eliminada).

Otro parámetro utilizado es m, que es el coeficiente de adsorción (o adhesión) de las gotitas de aceite sobre las partículas precipitadas, e indica la cantidad de DQO eliminada por la concentración de aluminio adicionada.

El parámetro que indica el efecto de la cantidad de aluminio presente en el sistema y el efecto global de la carga neta en mol/dm<sup>3</sup> que lo llamaron C<sub>nAl</sub>, que consistió en la suma de cargas netas de cada especie de aluminio considerado en el modelo.

$$C_{nAl} = 3 \cdot [Al^{3+}] + 2 \cdot [AlOH^{2+}] + [Al(OH)_2^+] - [Al(OH)_4^-]$$

Y han encontrado que el parámetro m es función del valor absoluto de la carga neta, y lo calcularon de la siguiente forma:

$$m = -47.83 \cdot \ln|C_{nAl}| - 360.05$$

Realizaron una comparación de la DQO experimental y modelada para diferentes experimentos y han obtenido un coeficiente de regresión (r<sup>2</sup>) de 0,92, cuyo valor es suficientemente alto para validar el modelo.

**Carmona M., et al., (2006) "A simple model to predict the removal of oil suspensions from water using the electrocoagulation technique".**

Los investigadores han desarrollado un modelo simple para predecir la eliminación de hidrocarburos fraccionados en aguas residuales usando electrodos de aluminio como ánodo. El modelo fue aplicado exitosamente para la interpretación de datos experimentales obtenidos en el laboratorio, utilizando una celda electroquímica.

Han modelado la adsorción de la materia orgánica sobre las partículas de  $Al(OH)_3$  usando 3 diferentes isothermas de adsorción. De acuerdo a los datos experimentales obtenidos han encontrado que con la ecuación tipo de Langmuir consiguieron el coeficiente de correlación más alto ( $r^2=0,973$ ).

Sostienen que el modelo fue capaz de describir los efectos de la densidad de corriente y la concentración de contaminantes sobre la eficiencia del tratamiento de aguas residuales.

Obtuvieron diferentes valores para los parámetros dependiendo de la naturaleza de hidrocarburo en suspensión. En donde el hidróxido de aluminio mostró alta afinidad por la suspensión de aceite/keroseno, pero presentó alta capacidad de eliminación en suspensiones pesadas de aceite.

La eliminación de contaminantes dependió de la concentración inicial y de la densidad de corriente. Cuando la densidad de corriente era suficiente para desestabilizar la emulsión, el potencial Z de la fracción limpia fue positiva a pH 7. La carga fue caracterizada por la reducción significativa de la turbidez, así mismo, la aplicación de alta densidad de corriente no permite un buen tratamiento del agua.

La celda electroquímica considerada por los investigadores en el modelación fueron electrodos placas paralelas de aluminio usados previamente por Khemis et al., 2004.

Para obtener las ecuaciones de los modelos estudiados, han realizado una serie de suposiciones simples, y haciendo un balance de masas de hidróxido de aluminio en la celda.

La ecuación empírica tipo Langmuir se derivó del intercambio iónico que se produce en el sistema y ha sido aplicada satisfactoriamente por otros investigadores como: Monteagudo et al., 2003; Bilba et al., 1999; De Lucas et al., 1998; Fernández et al., 1995.

$$q^* = \frac{n^\infty K C^*}{C_0 + (K - 1)C^*}$$

Donde  $n^\infty$ , es la capacidad del hidróxido de aluminio,  $q^*$  y  $C^*$  son respectivamente, la concentración de la fase sólido-líquido en el equilibrio;  $C_0$  es la concentración inicial de la fase orgánica,  $K$  es el factor de separación.

La cantidad de contaminante en la muestra fue determinada por la DQO, COT, turbidez, y potencial Z.

**Hu C. Y., et al., (2007). "Simulation the kinetics of fluoride removal by electrocoagulation (EC) process using aluminum electrodes".**

Los investigadores han desarrollado sus experimentos en un reactor bipolar por lotes, usando 7 electrodos de aluminio. El volumen de la solución en cada lote fue de 1 litro. Solamente los electrodos externos fueron conectados a una fuente de alimentación eléctrica para formar un sistema bipolar. El área activa de cada electrodo excluyendo los electrodos externos fue de 72 cm<sup>2</sup> (8x9 cm).

Han desarrollado un modelo cinético de orden variable derivada de la ecuación de Langmuir para simular la cinética de la defluorización de aguas por electrocoagulación usando electrodos de aluminio. La defluorización por flóculos de aluminio es una reacción de intercambio iónico. Los investigadores sostienen que, el intercambio iónico en el equilibrio puede ser desarrollado por la siguiente ecuación de Langmuir.

$$\Gamma = \frac{\Gamma_{\max} k [F^-]}{1 + k [F^-]}$$

Donde  $\Gamma$  son los moles de iones fluoruro eliminados por iones de aluminio a un pH conocido en el equilibrio,  $K$  (l/mol) es la constante de Langmuir,  $F^-$  concentración de iones fluoruro.

Realizaron una serie de ecuaciones para representar la velocidad de eliminación del fluoruro, la tasa de liberación del Al en el ánodo durante de electrocoagulación. Hicieron combinaciones de las mismas y han obtenido la siguiente ecuación:

$$\frac{-d[F^-]}{dt} = \varepsilon_{Al}\varepsilon_c \frac{nI}{ZFV} \frac{\Gamma_{max}k[F^-]}{1 + k[F^-]}$$

Donde  $\varepsilon_{Al}$ , es la eficiencia de formación del hidrofluoruro de aluminio (%);  $\varepsilon_c$  es la eficiencia de la corriente (%), Z valencia del aluminio, V volumen del reactor, n número de celdas, t es tiempo de reacción, F constante de Faraday, I es corriente en amperios,  $\Gamma_{max}$  es la cantidad máxima de moles de ion fluoruro eliminados.

Dicen que de acuerdo a esta ecuación la velocidad de defluorización sigue una reacción cinética de primer orden si  $1/k \gg [F^-]$ , y es de orden cero si  $[F^-] \gg 1/k$ , por lo tanto los autores sostienen que la velocidad de defluorización es de orden variable. A la ecuación obtenida lo llamaron modelo cinético de orden variable.

Los resultados han mostrado buena concordancia entre la ecuación pronosticada y los datos experimentales, obteniendo un coeficiente de correlación de 0,995. Los parámetros críticos como  $\Gamma_{max}$ , K, en la ecuación modelada son constantes cuando varía la concentración inicial del fluoruro y la corriente.

Han encontrado que la eficiencia de la corriente es independiente de la concentración inicial del fluoruro pero varía con la densidad de corriente y es necesario obtenerlo experimentalmente.

El modelo no puede simular con éxito la defluorización por electrocoagulación si el cambio del pH es demasiado violento ya que aparece el punto de equivalencia en la trayectoria de la curva.

**Zaroual Z., et al., (2009), "Optimizing the removal of trivalent chromium by electrocoagulation using experimental design".**

Los investigadores han observado la capacidad del proceso de electrocoagulación para eliminar el Cr (III) de soluciones acuosas usando electrodos de placas de aluminio, con un área efectiva del ánodo de 109 cm<sup>2</sup> y la distancia entre electrodos era de 10 mm. El reactor era un tanque cilíndrico de 5 litros de capacidad, la alimentación de la solución de cromo era continua y agitada a 300 rpm. Han tenido en cuenta muchos factores como el pH, el potencial, el tiempo y la temperatura de la solución. El pH de la solución estuvo entre 2 y 6. El potencial entre 2,5 y 10,5 V. El tiempo ha sido variado entre 10 y 30 minutos y la temperatura entre 15 y 35 °C.

Han alcanzado altas eficiencias de eliminación del cromo a alto potencial, y la electrocoagulación fue más efectiva a pH del medio  $\geq 4$ . Dicen que el mecanismo de eliminación del cromo probablemente sea la precipitación como Cr(OH)<sub>3</sub> y adsorción sobre el Al(OH)<sub>3</sub> precipitado, debido a que el producto de solubilidad del Al(OH)<sub>3</sub> es mucho menor que el del Cr(OH)<sub>3</sub>. Han observado también que al incrementarse el pH se favorece la precipitación del Al(OH)<sub>3</sub> y que al incrementarse la temperatura mejora la formación del hidróxido de aluminio.

Con el fin de controlar los factores antes mencionados y sus efectos sobre la electrocoagulación del Cr (III), han establecido un diseño estadístico utilizando los resultados experimentales como es la "Metodología de superficies de respuesta (RSM)". El RSM lo han utilizado para desarrollar, mejorar y optimizar el proceso de electrocoagulación, relacionando la eficacia de eliminación de cromo, el consumo de energía y las cuatro variables cuantitativas, es decir, el pH, el potencial de electrólisis, los tiempos de electrólisis, la temperatura y el aluminio remanente en la solución.

La representación gráfica de las variables con este modelo en el espacio les permitió definir las condiciones óptimas de los parámetros como son: el valor óptimo de pH fue 4,23; el potencial 9,14 V, el tiempo 10 min y la temperatura 27,5 °C. A estas condiciones han observado una eficiencia del 91% de la eliminación de cromo, con un consumo de energía de 3,536 kWh/m<sup>3</sup>.

**Ölmez T., (2009), The optimization of Cr(VI) reduction and removal by electrocoagulation using response surface methodology”.**

El investigador utilizó la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) para estudiar los efectos de las diferentes condiciones de funcionamiento en la eliminación de cromo hexavalente (Cr (VI)) por electrocoagulación con electrodos de acero inoxidable. Para ello utilizó un reactor de 2 litros de capacidad (28,3 x 12,5 x 34,3 cm) con 6 electrodos de acero inoxidable y una distancia entre electrodos de 2 mm y un área efectiva de cada electrodo era de 38,93 cm<sup>2</sup>. Los electrodos eran cilíndricos de 11,9 cm de largo y 1,02 cm de diámetro.

El agua residual procedía de un tanque de aclarado después del proceso de cromado, cuya concentración de Cr (VI) era de 1470 mg/l, el pH de 1,84, conductividad 6000  $\mu\Omega$ /cm, SS 80 mg/l, sólidos disueltos totales 2695 mg/l. El autor añadió cloruro de sodio con el fin de aumentar la conductividad iónica de la solución y minimizar el consumo de energía.

El Diseño Compuesto Central (DCC) Junto con la MSR fue utilizado para la optimización del proceso de electrocoagulación y evaluar los efectos y las interacciones de las variables del proceso: corriente eléctrica aplicada, concentración del electrolito y tiempo de aplicación en la eliminación de Cr (VI). Las condiciones óptimas para la completa eliminación del Cr (100%) fueron establecidos como: corriente eléctrica aplicada de 7.4 A, concentración del electrolito (NaCl) 33,6 mM y 70 minutos de tiempo de aplicación.

El investigador concluye que los modelos utilizados para predecir la eficiencia de eliminación del Cr (VI) consideran que son adecuadamente aplicables. El análisis de varianza mostró un alto valor de coeficiente de determinación ( $R^2 = 0,875$ ), garantizando un ajuste satisfactorio del modelo de regresión de segundo orden con los datos experimentales.

Los resultados en este estudio indican que la electrocoagulación es un método eficaz para la eliminación del Cr (VI). Debido al carácter ácido de las aguas residuales procedentes del aclarado del proceso de cromado, no fue necesario el ajuste del pH durante la reducción de Cr (VI) a Cr (III), ni durante la precipitación del Cr(OH)<sub>3</sub>. La reducción del Cr (VI), se observó en todos los niveles de la electrólisis incluso a valores de pH alto. La cantidad de lodos producido a las condiciones optimizadas en base al modelo fue inferior a la cantidad de lodos generado por el tratamiento químico convencional con FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O y no son peligrosos en la naturaleza.



Desde el punto de vista medioambiental, la electrocoagulación tiene un impacto significativo en la gestión y disposición final de los lodos.

## **2.11. En relación con el décimo primer objetivo. “Diseño de plantas optimizadas experimentales de electrocoagulación”**

**Sanchez C. L., et al., (2003), “An electrocoagulation unit for the purification of soluble oil waste of high COD”.**

Partiendo de las experiencias a nivel laboratorio y piloto, los investigadores han diseñado una unidad industrial, de las siguientes características:

Celda rectangular de 16 placas de aluminio de 0,30 x 0,35 m<sup>2</sup>, tiempo de retención de 0,03 h. Intensidad de corriente aplicada fue de 33 A/celda. Voltaje aplicado varió hasta 100 V.

Dicha planta trató una mezcla de aceites solubles con una DQO de 230.000 mg/l y SS de 12.000 mg/l, procedentes de una fábrica. El caudal tratado fue de 5000 m<sup>3</sup>/año. La eficiencia que han alcanzado fue de 94% para la DQO. El residuo era alimentado en forma discontinua a un tanque de homogenización, a partir de este punto el proceso era de forma continua. Primero separaban las grasas flotantes en un tanque para tal propósito, posteriormente en el siguiente tanque realizaban el ajuste del pH mediante la adición de NaOH y HCl, hasta pH 7. Después de ajustar el pH verificaban la conductividad en el siguiente tanque por adición de NaCl cuando era necesario, ajustaban la conductividad a 5 mΩ-1cm-1. Posteriormente el agua era introducida a la celda de electrocoagulación.

La espuma que se producía en la celda era continuamente separada por una rasqueta, luego el líquido clarificado era introducido a un tanque de sedimentación donde se adicionaba floculantes con el fin de ayudar a la sedimentación y flotación. Los lodos eran filtrados por un filtro prensa.

Los investigadores han realizado un estudio económico: El costo total de inversión fue de 374.336 euros, el costo total de equipamiento fue de 66 190 euros. El costo total de tratamiento fue calculado en 116,52 €/m<sup>3</sup> considerando una vida útil de los elementos de 10 años, excepto para el tanque de sedimentación que se consideró para 5 años y para el filtro presa se consideró 17 años.

**Escobar C., et al., (2004) *Optimization of the electrocoagulation process for the removal of copper, lead, and cadmium at natural waters and simulated wastewater. Journal of Environmental Management (en prensa).***

Consiste en un enfoque para la aplicación del proceso de electrocoagulación a nivel industrial, los investigadores establecieron una relación predecible entre la densidad de corriente y el consumo de energía específica, y han encontrado una relación lineal a pH = 7, obteniendo un  $r = 0,9964$ ,  $F = 272$ ,  $p = 0,004$ , que dio como resultado una ecuación del consumo de energía específica (kWh/m<sup>3</sup>) =  $0,049 \times j - 1,05$ , donde  $j$  es la densidad de corriente en A/m<sup>2</sup>.

Han observado que el consumo específico de la celda dependía del voltaje de la celda, del potencial de equilibrio, del sobrepotencial en el cátodo y en el ánodo y de la pérdida de voltaje óhmico en la celda.

Para la aplicación industrial, del proceso de electrocoagulación, realizaron estudios teóricos, evaluando el impacto de la velocidad de flujo sobre la eficiencia de eliminación del cadmio, han observado que el cobre y el plomo a pH 7 su eliminación era casi del 100%, mientras que del cadmio dependía de la densidad de corriente y de la velocidad del flujo. Tomando como referencia la cinética del cadmio, han encontrado una relación lineal de la concentración a través del tiempo con un  $r = 0,9936$ ,  $F = 155$ ,  $p = 0,0064$ . Los resultados han indicado una reacción cinética de primer orden con una tasa constante de 1,053 min<sup>-1</sup> para una densidad de corriente de 31 A/m<sup>2</sup>, también a una densidad de corriente de 11 A/m<sup>2</sup> se obtenía una ecuación cinética de primer orden. Pero la mayor eficiencia de eliminación fue a 31 A/m<sup>2</sup>.

Usando estos resultados y la eficiencia de eliminación del cadmio de 99,8% en la ecuación de flujo pistón (Levenspiel 1999) han determinado el tiempo de residencia que fue de 5,9 minutos, para un caudal de 100 m<sup>3</sup>/h, siendo el volumen del reactor a escala industrial de 9,83 m<sup>3</sup>.

La densidad de corriente utilizada fue de 31 A/m<sup>2</sup>, donde el consumo específico fue de 0,47 kWh/m<sup>3</sup>. Los investigadores sostienen que son necesarios estudios adicionales para verificar sus resultados y seguir perfeccionando los parámetros a escala industrial.

## **2.12. En relación con el décimo segundo objetivo. “Estudio energético del proceso”**

**Hasson D., et al., 2008, “Development of de electrochemical scale removal technique for desalination applications”.**

Los investigadores han realizado un estudio sobre necesidades de energía y área de electrodo para la eliminación electrolítica de CaCO<sub>3</sub>

Realizaron una serie de experimentos para obtener los datos de diseño de una celda electrolítica para el tratamiento de una solución que contiene carbonatos con alta concentración, complejante.

Para observar el efecto de la intensidad de corriente sobre el área específica requerida y el consumo de energía han realizado varios experimentos con un rango de corriente de 0,08 a 2,5 A, alimentados por una fuente de alimentación de corriente continua desde 2,5 a 8,4 V, con un caudal de alimentación de 2,3 l/min y número de Reynolds igual a 700.

Han encontrado que la eliminación del Ca<sup>2+</sup> en relación con el tiempo fue lineal, aumentaba la eficiencia de eliminación al incrementarse la intensidad de corriente de 0,08 a 2,5 A.

Sostienen que al relacionar la densidad de corriente A/m<sup>2</sup> tanto con el área específica catódica (m<sup>2</sup>/kg CaCO<sub>3</sub>/h) y el consumo de energía específica (kWh/kg CaCO<sub>3</sub> precipitado). Concluyen que al incrementar la densidad de corriente aumentaba la energía necesaria pero disminuye el tamaño del equipo.

**Chou W.-L., et al.,(2009), “Study of COD and Turbidity removal from real oxide – CMP wastewater by iron electrocoagulation and the evaluation of specific energy consumption”.**

### **Evaluación del consumo específico de energía**

Sostienen que es fundamental evaluar el consumo de energía eléctrica en el tratamiento de aguas residuales para decidir si la electrocoagulación es técnica y económicamente viable para la eliminación de la DQO de las aguas residuales. Una vez obtenidos datos de voltajes requeridos con sus correspondientes intensidades de corriente, en las pruebas de electrocoagulación, han podido estimar la cantidad de energía consumida.

Consideraron la concentración inicial y final de la DQO del agua residual a diferentes tiempos. El consumo específico de energía lo han calculado en función de 1 kg de DQO eliminado del agua residual durante la electrocoagulación en kWh/kg a voltaje constante según la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned} \text{SEC} &= \frac{U \int I dt}{(\text{COD}_0 \times V_0 - \text{COD}_t \times V_t) \times 3.6} \\ &= \frac{U \times I_{\text{avg}} \times \Delta t}{(\text{COD}_0 \times V_0 - \text{COD}_t \times V_t) \times 3.6} \end{aligned}$$

Donde U es el voltaje aplicado en voltios (V), I<sub>avg</sub> es la intensidad de corriente en A, t es el tiempo de electrólisis, COD<sub>0</sub> (mg/l) es la concentración de la DQO inicial, COD<sub>t</sub> (mg/l) es la DQO final al tiempo t, V<sub>0</sub> es el volumen inicial del agua residual a tratar en litros, V<sub>t</sub> volumen el litros del agua residual tratada por electrocoagulación.

Han evaluado el efecto del voltaje aplicado sobre el consumo específico de energía y la eficiencia de eliminación de la DQO. La concentración inicial de la DQO fue de 571 mg/l, concentración del electrolito de 200 mg/l, con agitación de 300 rpm, la distancia entre electrodos era de 2 cm, el voltaje aplicado fue de 10 – 30 V. Han observado que al aumentar el voltaje se incrementó la eficiencia de eliminación de la DQO. Cuando el voltaje aplicado fue de 10 a 20 V, la eficiencia de eliminación de la DQO fue apreciable de 62,3 % a 77,3 % con un consumo de energía ligeramente incrementado. Mientras que al incrementar el voltaje de 20 a 30 V, la eficiencia de eliminación de la DQO se incrementó ligeramente de 77,3 a 82,5%, con

consumo de energía incrementado significativamente. Considerando ambos, consumo de energía y eficiencia de eliminación de la DQO, el voltaje aplicado de 20 V proporcionó un balance óptimo para el proceso de electrocoagulación, con una razonable eficiencia de eliminación de la DQO con un consumo de energía relativamente bajo.

**Efecto de la concentración del electrolito sobre el consumo de energía y la eficiencia de eliminación de la DQO.**

Los experimentos realizados fueron a 20 V, tiempo de electrólisis más de 20 minutos, DQO inicial de 571 mg/l, pH 2,5; distancia de separación entre electrodos 2 cm, y agitación a 300 rpm. Han observado que al aumentar la concentración del electrolito de 100 a 200 mg/l la eficiencia de eliminación de la DQO se incrementó de 78% a 86%, con un consumo de energía incrementado ligeramente de  $1,29 \times 10^{-3}$  kWh/kg a  $1,84 \times 10^{-3}$  kWh/kg. Así mismo cuando la concentración del electrolito se incremento de 200 a 300 mg/l, la eficiencia de eliminación de la DQO se incrementó ligeramente de 86 a 92% con un consumo de energía incrementado de  $1,84 \times 10^{-3}$  kWh/kg a  $2,98 \times 10^{-3}$  kWh/kg. Considerando ambos parámetros el consumo de energía y la eficiencia de eliminación de la DQO, la concentración óptima de 200 mg/l de NaCl proporcionó un balance óptimo con una eficiencia de eliminación de la DQO deseable y un consumo de energía relativamente bajo.



## **ANEJO 2. BITÁCORA Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**





# INDICE



# INDICE

1. BITÁCORA Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	1
1.1. Primera fase	1
1.2. Segunda fase	18
1.3. Tercera fase	43



# ANEJO 2. BITÁCORA Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

## 1. BITÁCORA Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

La investigación se desarrolló en tres fases

### **1.1. Primera fase**

Para la puesta en contacto con el tema, antes de iniciar la investigación, se construyó un reactor de vidrio, de dimensiones internas útiles de 35×89×3 cm para la electrocoagulación de las aguas en el que se instalaron dos placas metálicas de aluminio de 54×38,4 cm.

Para las medidas de la evolución del proceso de electrocoagulación se utilizaron los siguientes medidores:

Fuente de alimentación 0 - 58 VCC, 0 - 9 ACC, 570 W, marca Grelco.

Multímetro digital de precisión Brymen, modelo BM817.

pHmetro Crisol modelo 507.

Conductímetro Crisol modelo 524.

Bomba de 900 l/h.

En la foto adjunta se muestra el equipo inicial de experimentación sobre la de electrocoagulación para ensayos con de aguas sintéticas, de ríos y residuales.

Desde el comienzo de la fase experimental de la tesis, (Marzo del 2006), hasta el (25/IV/08) empecé la puesta en contacto con la tecnología de la electrocoagulación, poniéndome en contacto con estos tipos de instalaciones. Instalé en consecuencia un dispositivo experimental, que aparece en la foto siguiente.



Figura 1.- Dispositivo experimental de electrocoagulación de aguas.

Se preparó una disolución concentrada de agua sintética compuesta con  $\text{KNO}_3$  de concentración aproximada de 2 g/l de N de nitratos y  $\text{K}_2\text{SO}_4$  con concentración de 20 g/l de sulfatos. Esta disolución se sometió a estudio experimental para comprobar la eliminación de sulfatos y nitratos por electrolisis con placas de aluminio.

Se rellenó la cuba electrolítica con 6 l de disolución concentrada diluida con agua destilada para alcanzar una concentración aproximada de 500 mg/l de sulfatos.

### **Primera etapa de ensayos choque**

#### **Resultados previos**

#### **Con aguas preparadas**

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las experiencias realizadas. Toda la información se estudia y discute en el capítulo siguiente, por lo que los comentarios incluidos aquí son los mínimos indispensables.

**Experiencia 1.- Eliminación de sulfatos y nitratos**

Tiempo minuto	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temperatura °C	pH	Conduct $\mu$ S/cm	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> mg/l	Al <sup>+3</sup> mg/l
0	12	41,55	18,2	6,9	1216	457	36,3	0,051
1	11,9	42,37						
2	11,7	42,29						
3	11,5	42,37						
4	11,4	42,37						
5	11,4	42,45						
6	11,4	42,45	19,0	8,88	1174	470	36,9	0,208

De este ensayo pueden extraerse las siguientes conclusiones, para una diferencia de potencial de 11,6 V y 42,26 A/m<sup>2</sup>,:

- Sin efecto apreciable sobre sulfatos y nitratos
- Elevación de la temperatura en 0,8°C, 0,13°C/m
- Alcalinización, pasa el pH de 6,9 a 8,88
- Incremento del ión aluminio en las aguas
- Descenso de la conductividad

Se repitió el ensayo, elevando el voltaje, manteniéndole en 12,1 V, y 34,97 A/m<sup>2</sup>, durante 5 minutos.



Figura 2.- Electrocoaguladores de 10, 3, 4 y 1 cm de separación de placas.

Se repitió el ensayo, elevando el voltaje, manteniéndole en 12,1 V, y 34,97 A/m<sup>2</sup>, durante 5 minutos.

### Experiencia 2.- Eliminación de sulfatos y nitratos

Tiempo min	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temperatura °C	pH	Conduct μS/cm	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> mg/l	Al <sup>+3</sup> mg/l
0	12,1	39,92	15,6	6,78	1268	457	36,3	
0,5	12,1	39,43						
1	12,1	41,14	15,8	7,8	1196	430	37	
1,5	12,0	29,06						
2	12,0	34,78						
2,5	12,1	37,39						
3	12,1	37,96	16,2	8,26	1180	460	36,6	0,61
3,5	12,1	18,53	16,2	8,21	1291			
4	12,1	28,57						
4,5	12,1	32,82						
5	12,1	35,10	16,5	8,44	1153	402	36	

Los resultados obtenidos pueden concretarse en:

- Efecto reductor de sulfatos en un 10%
- Efecto reductor de nitratos poco significativo
- Elevación de la temperatura en 0,9°C, 0,18°C/m
- Alcalinización, pasa el pH de 6,78 a 8,44
- Incremento del ión aluminio en las aguas
- Descenso de la conductividad en un 10%

En el siguiente ensayo se incremento el voltaje a una media de 36,12 V, y 31,14 A/m<sup>2</sup>

### Experiencia 3.- Eliminación de sulfatos y nitratos

Tiempo min	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temperatura °C	pH	Conduct μS/cm	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> mg/l	Al <sup>+3</sup> mg/l
0	40,3	31,14	15,8	6,15	13,75	432	47	
1	35,0	31,14		10,28	12,71	258	27	
3	35,3	31,14	22,7	10,39	1167	250	22	
6	33,9	31,14	25,0	10,47	10,25	207	15	

Los resultados obtenidos pueden concretarse en:

- Efecto reductor de sulfatos en un 52%
- Efecto reductor de nitratos en un 68%



- Elevación de la temperatura en 9,2°C, 1,53°C/m
- Alcalinización, pasa el pH de 6,15 a 10,47
- Descenso de la conductividad en un 25%

En el siguiente ensayo se redujo el voltaje a 3 V, y una media de 0,97 A/m<sup>2</sup>

#### Experiencia 4.- Eliminación de sulfatos y nitratos

Tiempo min	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temperatura °C	pH	Conduct μS/cm	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> mg/l	Al <sup>+3</sup> mg/l
0	3,00	1,17	16,3	6,42	1223	432	47	
1	3,00	0,82	16,3	5,85	1134	420	50	
3	3,00	0,82	16,5	5,76	1070	432	52	
6	3,00	0,82	16,5	5,81	1014	382	53	

Los resultados obtenidos pueden concretarse en:

- Efecto reductor de sulfatos en un 11%
- Efecto reductor de nitratos poco significativo
- Elevación de la temperatura en 0,2°C, 0,03°C/m
- Acidificación, pasa el pH de 6,42 a 5,81
- Descenso de la conductividad en un 17%

El siguiente ensayo, dentro de los ensayos choque, sirvió para determinar el equivalente en agua

#### Experiencia 5

Para el estudio de la energía consumida en la electrolisis, descontando la fracción de corriente que se consume por efecto térmico, incremento de temperatura del contenido del electrocoagulator, se calculó el equivalente en agua del recipiente de electrolisis.

Se pusieron en el electrocoagulator 6 l de agua a temperatura ambiente de 17,6 °C, a los que se añadió 0,5 l de agua a 43,6 °C, obteniéndose una mezcla homogeneizada de 21,3 °C, efectuando un balance de calor se obtiene:

$$6000 \times 1 \times (21,3 - 17,6) + m \times 1 \times (21,3 - 17,6) = 500 \times (43,6 - 21,3)$$

Siendo  $m$  la masa del electrocoagulador equivalente en agua, expresada en gramos. De la ecuación anterior se obtiene:

$$m = 2413$$

La siguiente experimentación se dirigió a la eliminación de fósforo en fosfatos, manteniendo una diferencia de potencial de 35,1 V, y variando de 12,24 a 1,96 los A/m<sup>2</sup>

### Experiencia 6 Eliminación de fósforo en fosfatos

Se preparó una disolución concentrada de K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> que, por dilución, daba una concentración en fósforo de fosfatos de 20 mg/l, que se sometió a electrolisis obteniéndose los siguientes resultados:

Tiempo min	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temperatura °C	pH	Conduct μS/cm	P-PO <sub>4</sub> mg/l
0	35,1	12,24	16,4	8,10	103	20
1	35,1	6,86	16,5	8,17	107	11
3	35,1	3,10	16,7	8,32	107	11
6	35,1	1,96	16,9	8,32	105	10

Los resultados pueden concretarse en:

- Reducción de fosfatos del 50%, con casi la misma reducción en el primer minuto, periodo en el que pasan de 12,24 a 6,86 los A/m<sup>2</sup>
- La temperatura se eleva en 0,5°C, 0,083°C/m
- La alcalinización es ligera, pasando el pH de 8,10 a 8,32
- Sin modificación apreciable en conductividad

### Experiencia 7 Eliminación de fósforo en fosfatos

En este ensayo, se bajó la diferencia de potencial a 12 V, A/m<sup>2</sup> de 0,82 a 0.

Tiempo min	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temperatura °C	pH	Conduct $\mu$ S/cm	P-PO4 mg/l
0	12	0,82	16,4	8,21	103	19
1	12	0,00	16,5	8,15	101	19
3	12	0,00	16,5	8,03	101	19
6	12	0,00	16,5	7,99	100	19

Los resultados pueden concretarse en:

- Reducción de fosfatos nula.
- La temperatura se eleva en 0.1°C, 0,016°C/m
- La acidificación es ligera, pasando el pH de 8,20 a 7,99
- Sin modificación apreciable en conductividad

La siguiente experiencia, dentro de los ensayos choque, pasó a la utilización de aguas naturales.

Con una diferencia de potencial pasando de 21,1 a 25,2, manteniendo el valor A/m<sup>2</sup> en torno al 42,3, con duración del ensayo durante 6 minutos.

Se trató agua del río Manzanares, tomada 1 km aguas abajo del Puente de los Franceses.

### Experiencia 8

Tiempo min	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp. °C	pH	Conduct $\mu$ S/cm	DQO mg/l	P-PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	Al <sup>+3</sup> mg/l
0	21,1	42,31	16,3	7,45	428	38	0,3	59	4,0	0,09
1	25,2	42,32	16,6	7,46	406	64	<0,3	67	3,9	0,25
3	25,0	42,33	17,2	7,75	388	51	<0,3	71	3,6	0,26
6	25,2	42,37	18,0	8,02	373	53	<0,3	68	3,7	0,58

Los resultados pueden concretarse en:

- Sin reducción de sulfatos
- Reducción poco significativa de nitratos
- Reducción de fosfatos escasamente definida.
- La temperatura se eleva en 1,7°C, 0,28°C/m
- La alcalinización ligera, pasando el pH de 7,45 a 8,02
- Sin reducción en DQO

- Con reducción apreciable en conductividad, descenso de un 12,8%.

Con las mismas aguas, se repitieron los ensayos, bajando la diferencia de potencial a 12 V, y el valor de A/m<sup>2</sup> a 19,32.

### Experiencia 9

En esta experiencia se trató la misma agua del río Manzanares de la experiencia anterior.

Tiempo min	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp. °C	pH	Conduct μS/cm	DQO mg/l	P-PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	Al <sup>+3</sup> mg/l
0	12,0	18,95	16,7	7,28	441	47	0,2	70	--	0,17
1	12,0	19,57	16,9	7,34	427	64	<0,2	68	3,6	0,20
3	12,0	19,53	17,2	7,43	401	58	0,3	73	--	--
6	12,0	19,21	17,5	7,56	389	53	<0,2	69	7,8	0,19

- Los resultados pueden concretarse en:
- Sin reducción de sulfatos
- Reducción poco significativa de nitratos
- Reducción de fosfatos escasamente definida.
- La temperatura se eleva en 1,7°C, 0,28°C/m
- La alcalinización ligera, pasando el pH de 7,28 a 7,56
- Sin reducción en DQO
- Con reducción apreciable en conductividad, descenso de un 10%.
- Ligero incremento del ión aluminio.



Figura 3.- Dispositivo experimental de medida.

En el siguiente ensayo se tomaron aguas más contaminadas, trabajando con diferencia de potencial de 16,6 V, y valor de A/m<sup>2</sup> de 104,7, incrementando el estudio con parámetros biológicos.

### Experiencia 10

A efectos de tratar un agua más contaminada, se tomó agua del Manzanares unos 50 m aguas debajo de la depuradora de la China, realizando la electrocoagulación que a continuación se indica en las siguientes tablas:

Tiempo Min	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp. °C	pH	Conduct μS/cm	DQO mg/l	P-PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	Al <sup>+3</sup> mg/l
0	16,6	104,7	15,9	7,84	612	53		81	2,2	0,07
1	16,6	104,7	17,1	7,88	599	93		83	2,1	<0,1
3	16,5	104,1	17,6	8,04	576	49		88	2,1	0,39
7:30	1,30	8,2	18,5	8,02	560	52		86	2,0	0,51

Tiempo min	Voltaje V	Colif. totales	E. coli
0	16,6	265·10 <sup>3</sup>	72·10 <sup>3</sup>
1	16,6	--	--
3	16,5	167·10 <sup>3</sup>	39·10 <sup>3</sup>
7:30	1,30	112·10 <sup>3</sup>	23·10 <sup>3</sup>

Los resultados pueden concretarse en:

- Sin reducción de sulfatos
- Reducción poco significativa de nitratos
- La temperatura se eleva en 2,6°C, 0,34°C/m
- La alcalinización ligera, pasando el pH de 7,84 a 8,02
- Sin reducción en DQO
- Con reducción apreciable en conductividad, descenso de un 10%.
- Ligero incremento del ión aluminio.
- Reducción en coliformes totales del 57%
- Reducción de E. Coli del 67%



Figura 4.- Lugar de toma de muestra en el Manzanares, aguas debajo de la depuradora La China.

Se repitió el ensayo con las mismas aguas, elevando la diferencia de potencial a 50 V, con valores de A/m<sup>2</sup> de 107,4, con duración del ensayo de seis minutos.

### **Experiencia 11**

Con agua tomada aguas debajo de la depuradora de la China obtuvieron los resultados siguientes:

Tiempo min	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp. °C	pH	Conduct $\mu$ S/cm	DQO mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	Al <sup>+3</sup> mg/l
0	50	101,2	17,5	8,30	585	44	80	2,0	0,14
3	50	111,7	21,5	8,62	525	63	94	1,9	1,72
6	50	109,4	24,5	8,48	543	45	88	1,9	1,75

Tiempo min	Voltaje V	Colif. totales	E. coli
0	50	35·10 <sup>3</sup>	4,5·10 <sup>3</sup>
3	50	18,5·10 <sup>3</sup>	4·10 <sup>3</sup>
6	50	0	0

Los resultados pueden concretarse en:

- Sin reducción de sulfatos
- Reducción poco significativa de nitratos
- La temperatura se eleva en 7,0°C, 1,16°C/m
- La alcalinización ligera, pasando el pH de 8,3 a 8,48
- Sin reducción en DQO
- Con reducción apreciable en conductividad, descenso de un 10%.
- Ligero incremento del ión aluminio.
- Reducción en coliformes totales del 100%, en seis minutos.
- Reducción de E. Coli del 100%
- Generación de flotantes importante.

En el siguiente ensayo se incremento la diferencia de potencial a 100 V, con valor de A/m<sup>2</sup> de 149,5 a 181,6. Duración del ensayo de 120 segundos.

## Experiencia 12

Agua del Manzanares tomada aguas abajo del puente de los Franceses:

Tiempo seg	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp. °C	pH	Conduct $\mu$ S/cm	DQO Mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	Al <sup>+3</sup> mg/l
0	100	149,5	15,2	7,65	401	59	45	4,2	0,17
30	100	156,3	16,9	7,86	390	47	68	4,1	1,77
60	100	181,6	20,5	8,36	393	39	66	4,1	1,71
120	100	173,2	23,1	8,40	379	37	65	4,0	1,75

Tiempo min	Voltaje V	Colif. totales	E. coli
0	100	$25 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$
30	100	$3,8 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$
60	100	$1,4 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^3$
120	100	$4,5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$

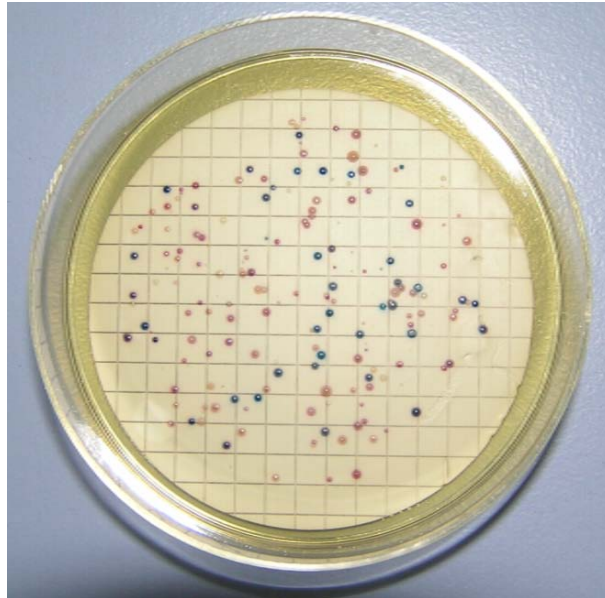


Figura 5.- Contaje de microorganismos, el número de coliformes totales están representados por las colonias azules violáceas y rojas salmón, el número de E. coli se corresponde con las colonias azules.

Los resultados pueden concretarse en:

- Sin reducción de sulfatos
- Reducción poco significativa de nitratos
- La temperatura se eleva en  $7,9^{\circ}\text{C}$ ,  $3,95^{\circ}\text{C}/\text{m}$
- La alcalinización ligera, pasando el pH de 7,65 a 8,40
- Reducción en DQO del 37%, en 2 minutos.
- Con reducción apreciable en conductividad, descenso de un 5%.
- Ligero incremento del ión aluminio.
- Reducción en coliformes totales del 82%, en 2 minutos.
- Reducción de E. Coli del 83%



En el siguiente ensayo se elevó la diferencia de potencial a 150 V, situándose el valor de A/m<sup>2</sup> entre 199,4 y 255,6, duración del ensayo 45 segundos.

**Experiencia 13**

Agua del Manzanares tomada aguas abajo del puente de los Franceses:

Tiempo seg	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp. °C	pH	Conduct μS/cm	DQO Mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	Al <sup>+3</sup> mg/l
0	150	199,4	13,4	7,91	408	38	55	4,7	0,21
15	150	230,6	15,8	7,87	405	45	74	5,0	1,79
30	150	233,8	17,4	6,50	417	44	70	4,5	1,72
45	150	255,6	20,7	7,06	410	43	71	4,3	1,76

Tiempo segundo s	Voltaje V	Colif. totales	E. coli
0	150	38·10 <sup>3</sup>	--
15	150	2,2·10 <sup>3</sup>	--
30	150	8,1·10 <sup>3</sup>	1,0·10 <sup>3</sup>
45	150	15·10 <sup>3</sup>	2,9·10 <sup>3</sup>



Figura 6.- Fuente de alimentación de corriente continua.

Los resultados pueden concretarse en:

- Sin reducción de sulfatos
- Reducción poco significativa de nitratos
- La temperatura se eleva en 7,3°C, 16,2°C/m
- La alcalinización ligera.
- Sin reducción en DQO
- Sin reducción apreciable en conductividad.

- Ligero incremento del ión aluminio.
- Reducción en coniformes totales del 94%, en los 15 primeros segundos, con tendencia a incrementarse a partir de ese momento.

Se continuaron los ensayos elevando la diferencia de potencial a 200 V, manteniéndose el valor de la A/m<sup>2</sup> entre 313,6 y 344, con tiempo de ensayo de 45 segundos.

#### Experiencia 14

Agua del Manzanares tomada aguas abajo del puente de los Franceses:

Tiempo seg	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp. °C	pH	Conduct μS/cm	DQO Mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	Al <sup>+3</sup> mg/l
0	200	313,6	17,4	7,81	439	94	62	6,1	0,16
15	200	344,0	19,8	7,68	437	39	69	6,0	1,71
30	175	316,0	21,7	7,73	447	32	69	5,6	1,76
45	162	326,2	24,7	7,93	432	40	69	5,7	1,72

Tiempo min	Voltaje V	Colif. totales	E. coli
0	200	87·10 <sup>3</sup>	--
15	200	47·10 <sup>3</sup>	--
30	175	12·10 <sup>3</sup>	13·10 <sup>3</sup>
45	162	24·10 <sup>3</sup>	39·10 <sup>3</sup>

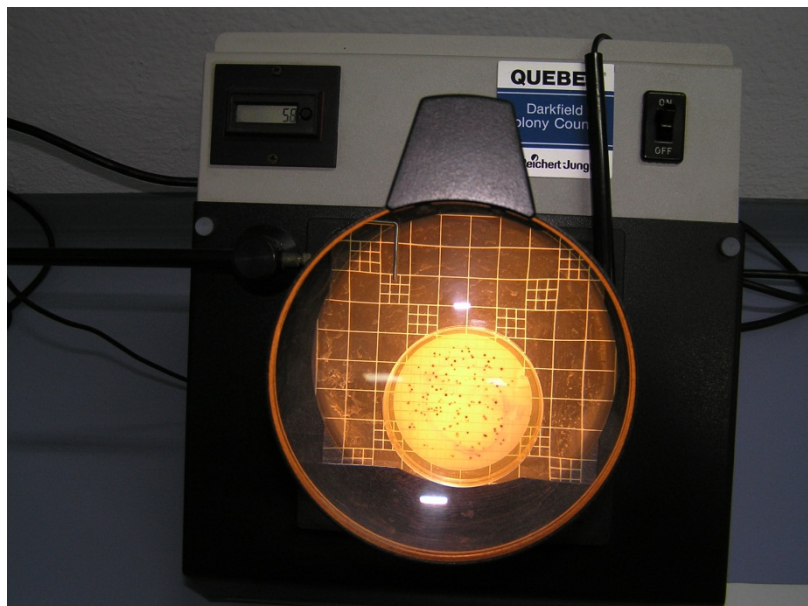


Figura 7.- Contador de colonias.

Los resultados pueden concretarse en:

- Sin reducción de sulfatos
- Reducción poco significativa de nitratos
- La temperatura se eleva en 7,3°C, 16,2°C/m
- La alcalinización ligera.
- Reducción en DQO en un 57%.
- Con reducción apreciable en conductividad, descenso de un 10%.
- Ligero incremento del ión aluminio.
- Reducción en coliformes totales del 72%, en 45 segundos, máximo rendimiento del 86%, en 30 segundos.

#### **Experiencia nº 15. Equivalente en agua del electrocoagulador**

Para el estudio de la energía consumida en la electrolisis, descontando la fracción de corriente que se consume por efecto térmico, e incremento de temperatura del contenido del electrocoagulador, se calculó el equivalente en agua del recipiente de electrolisis, en función del volumen de líquido en el electrocoagulador, obteniéndose los resultados siguientes:

Volumen, l.	Equivalente en agua, g.
0,70	411
1,70	754
2,70	900
3,70	270
4,70	1050

#### **Experiencia nº 16 Efecto de la separación entre placas**

Se sometió a agua del grifo, de conductividad próxima a 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , a electrocoagulación con separación entre placas de 10,1, 9, 7,4 y 3,25 cm, obteniéndose los resultados que se muestran en las siguientes tablas:

Electrocoagulación con separación de placas de 10,1 cm, $S_{\text{placas}}=48 \times 27$ cm				
V	I	$I/m^2$	Temp.	Cond.
5	0,030	0.232	14,4	101,0
10	0,092	0.710	14,5	100,6
15	0,148	1.142	14,4	100,1
20	0,210	1.620	14,5	99,9
25	0,275	2.122	14,5	99,6
30	0,340	2.624	14,5	99,2
35	0,401	3.094	14,5	99,0
40	0,475	3.665	14,5	98,7
45	0,531	4.097	14,5	98,2
50	0,597	4.607	14,6	98,1
55	0,659	5.085	14,6	97,6
60	0,722	5.571	14,6	97,5
65	0,789	6.088	14,6	97,1
70	0,855	6.597	14,7	96,8
75	0,925	7.137	14,7	97,1
80	0,988	7.624	14,7	97,0
85	1,111	8.573	14,9	97,6
90	1,188	9.167	15,0	98,1
95	1,260	9.722	15,0	98,0
100	1,336	10.309	15,1	97,1
110	1,475	11.381	15,3	97,3
120	1,611	12.431	15,4	97,0
130	1,752	13.519	15,5	97,0
140	1,899	14.653	15,6	97,3
150	2,040	15.741	15,8	97,7
175	2,409	18.588	15,9	98,6
200	2,765	21.336	16,1	98,8
225	3,140	24.228	16,4	99,4

Electrocoagulación con separación de placas de 9 cm, $S_{\text{placas}}=48 \times 27$ cm				
V	I	$I/m^2$	Temp.	Cond.
5	0,052	0.401	18,2	103,7
10	0,150	1.157	18,2	103,5
15	0,200	1.543	18,3	103,3
25	0,378	2.917	18,3	103,1
40	0,626	4.830	18,3	102,7
55	0,872	6.728	18,3	101,1
70	1,123	8.665	18,4	102,2
85	1,388	10.710	18,4	103,1
100	1,632	12.593	18,5	102,5
120	1,983	15.301	18,7	103,5
140	2,323	17.924	18,8	103,7
160	2,676	20.648	19,1	102,8
180	3,035	23.418	19,3	101,2
200	3,403	26.258	19,7	101,7
220	3,773	29.113	20,1	101,6

Electrocoagulación con separación de placas de 7,4 cm, $S_{placas}=48 \times 27$ cm				
V	I	$I/m^2$	Temp.	Cond.
5	0.070	0.540	19,4	102,3
10	0.169	1.304	19,4	100,8
15	0.264	2.037	19,4	99,6
25	0.459	3.542	19,5	98,9
40	0.754	5.818	19,5	98,2
55	1.045	8.063	19,5	97,6
70	1.262	9.738	19,5	98,2
85	1.652	12.747	19,6	98,0
100	1.955	15.085	19,8	97,8
120	2.345	18.094	19,9	98,5
140	2.764	21.327	20,3	97,8
160	3.180	24.537	20,6	97,4
180	3.626	27.978	21,1	97,5
200	4.078	31.466	22,1	99,1

Electrocoagulación con separación de placas de 3,25 cm, $S_{placas}=50 \times 35$ cm				
V	I	$I/m^2$	Temp.	Cond.
5	0.156	0.843	21,0	101,7
10	0.554	2.995	21,1	99,8
15	0.821	4.438	21,1	99,1
20	1.174	6.346	22,0	94,1
25	1.467	7.930	21,2	97,7
30	1.727	9.335	22,0	93,6
40	2.396	12.951	21,2	96,9
50	2.934	15.859	22,1	91,8
55	3.315	17.919	21,4	96,5
65	3.872	20.930	21,7	95,6

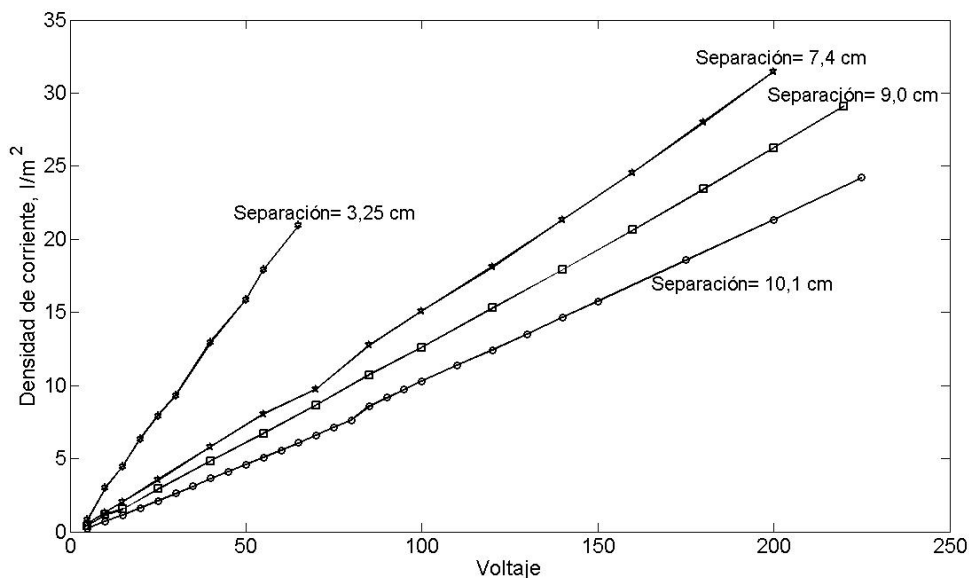


Figura 8.- Representación de la densidad de corriente obtenida en función del voltaje y la separación de placas en la electrocoagulación.

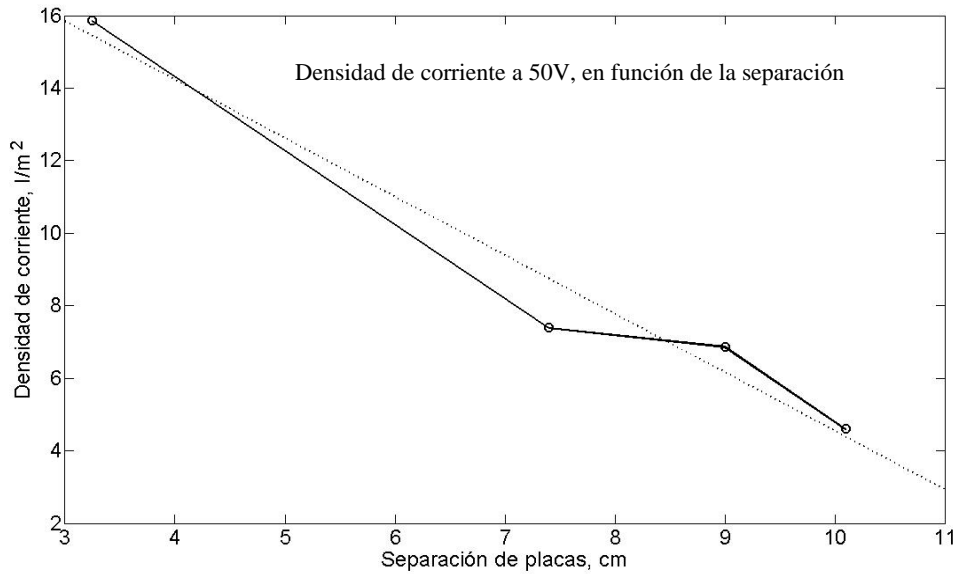


Figura 9.- Densidad de corriente en función de la separación de las placas del electrocoagulador, a voltaje constante.

1. En función con el cumplimiento de los sistemas de electrocoagulación con las normativas actuales de reutilización, referentes a los parámetros fisicoquímicos como son: SS, turbidez, nitrógeno y fósforo

## 1.2. Segunda fase

### Experiencia 17 (25/IV/08). Eliminación de metales pesados

Experiencias realizadas con electrocoaguladores de aluminio, separación de placas de 3,25 cm y disolución sintética, cuya composición se indica en el cuadro siguiente.

Producto	Concentración g/l
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1.6
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	14.6
P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	1.1
Ni <sup>2+</sup>	85
Cu <sup>2+</sup>	90
Cr <sup>2+</sup>	3

Con diferencia de potencial de 10,5 V, A/m<sup>2</sup> entre 57,6 y 59,97, duración del ensayo de 120 segundos. Los resultados fueron:

Tiempo seg	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp. °C	pH	Conduct μS/cm	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l
0	10		19.9	3.65	900	31.4	398	61.9
30	10	57.60	20.4	4.60	859	24.6	386	59.3
60	11	57.60	21.6	6.10	754	10.6	386	59.3
120	11	59.97	22.5	8.38	704	--	392	58.9

Tiempo seg	Cu	Ni	Cr
0	2115	1082	72.7
30	419	730	10.7
60	88	440	6.0
120	8	330	6.0

Los resultados pueden concretarse en:

- Sin reducción de sulfatos
- Reducción poco significativa de nitratos
- Reducción de fósforo en fosfatos del 66%, en 60 segundos.
- La temperatura se eleva en 2,6°C, 1,3°C/m
- Alcalinización importante , pasando el pH de 3,65 a 8,38
- Con reducción apreciable en conductividad, descenso de un 21%.
- Descenso del Cu en un 99%.
- Reducción del níquel en un 69%.
- Reducción del cromo en un 91%.

### Experiencia 15-1 (28/IV/08)

Tiempo seg	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp. °C	pH	Conduct μS/cm	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l
0	15		21.7	3.59	933	32.6	348	62.4
30	15	98.18	22.1	4.85	835	21.0	360	62.4
60	15	98.18	22.3	6.85	761	9.0	360	60.2
120	15	120.0	22.8	8.64	723	4.2	360	60.4

Tiempo seg	Cu	Ni	Cr
0	2998	3845	85.7
30	1307	2000	8.4
60	24	301	6.1
120	27	32	6.1

**Experiencia 16-1 (30/IV/08)**

Tiempo seg	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp. °C	pH	Conduct μS/cm	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l
0	15		20.2	3.47	923	34.8	298	65.0
30	15	99.65	20.2	4.87	778	20.6	336	65.6
60	15	117.9	20.7	7.01	661	15.4	322	64.0
120	15	139.7	21.2	8.77	617	2.2	324	58.0

Tiempo seg	Cu	Ni	Cr
0	1821	1478	68.2
30	1226	680	7.8
60	146	293	7.5
120	12	22	5.9

**Experiencia 17-1 (30/IV/08)**

Tiempo seg	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp. °C	pH	Conduct μS/cm	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l
0	15		20.4	3.49	666	34.8	--	65.0
30	13	80.95	21.0	4.69	530	20.2	320	63.2
60	14	90.3	21.3	6.90	512	9.6	318	59.4
120	15	99.23	22.0	8.84	494	3.6	334	58.4

Tiempo seg	Cu	Ni	Cr
0	1821	1477	68.2
30	558	773	8.4
60	87	192	8.6
120	20	19	6.5

Experiencias realizadas con electrocoagulador con placas de Fe, y la misma disolución sintética:

**Experiencia 18 (28/V/08)**

Tiempo Seg	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp. °C	pH	Conduct μS/cm	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l
0	10		20.0	3.28	750	24.8	349	62.7
30	10	49.51	20.3	5.26	662	19.5	345	62.6
60	10	49.83	20.8	6.16	575	12.8	337	61.4
120	10	51.31	21.5	8.90	538	6.6	352	62.4

Tiempo seg	Cu	Ni	Cr	Zn
0	4142	1300	111	1580
30	45	875	11	600
60	207	287	7	130
120	105	133	4	30



**Experiencia 19 (29/V/08)**

Tiempo seg	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp. °C	pH	Conduct μS/cm	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l
0	31		20.1	5.12	665	30,2	334	64,8
30	31	198.7	21.6	5.40	592	19,6	358	77,8
60	31	176.4	22.8	5.56	536	15,4	370	64,6
120	31	185.9	24.5	6.40	507	12,3	362	61,8

Tiempo seg	Cu	Ni	Cr	Zn
0	3851	1220	82	1580
30	1043	617	13	1230
60	39	340	1	370
120	218	107	2	40

**Experiencia 20 (3/VI/08)**

Tiempo seg	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp. °C	pH	Conduct μS/cm	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l
0	40		20.3	4.73	640	30,25	358	60,0
30	40	226.1	22.4	5.30	545	15,75	330	54,8
60	40	256.8	24.0	5.80	480	10,50	358	60,0
120	40	241.9	26.0	6.82	450	8,25	368	60,8

Tiempo seg	Cu μg/l	Ni μg/l	Cr μg/l	Zn μg/l
0	3953	967	88	
30	256	504	3,0	
60	57	175	3,0	
120	130	65,0	5,0	

**Experiencia 21 (5/VI/08)**

Tiempo Seg.	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp. °C	pH	Conduct μS/cm	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l
0	10		22.2	5.61	1465	30,5	399	62,0
30	10	47.2	22.5	6.48	1468	11	395	67,5
60	10	48.3	22.9	6.98	1474	10	405	64,0
120	10	50.8	23.6	8.67	1493	7,5	400	85,0

**Experiencia 22 (6/VI/08)**

Tiempo seg	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp. °C	pH	Conduct μS/cm	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l
0	22		21.1	5.27	1430	45,5	390	61,0
30	23	114.2	22.0	5.52	1442	16,0	375	58,5
60	23	126.6	23.2	6.40	1461	8,0	365	54,0
120	23	126.8	24.5	8.91	1492	8,0	400	58,5

## Experiencia 23 (9/VI/08)

Tiempo seg	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp. °C	pH	Conduct μS/cm	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l
0	39		21.9	4.73	1459	25,5	385	59,0
30	40	212.0	23.5	5.55	1498	13,5	395	59,0
60	40	232.7	25.1	7.65	1528	12,0	405	60,5
120	40	245.8	26.9	8.77	1581	1,50	395	57,5



Figura 10: Aspecto de la filtración del agua tratada a 40 V, con electrodos de hierro.

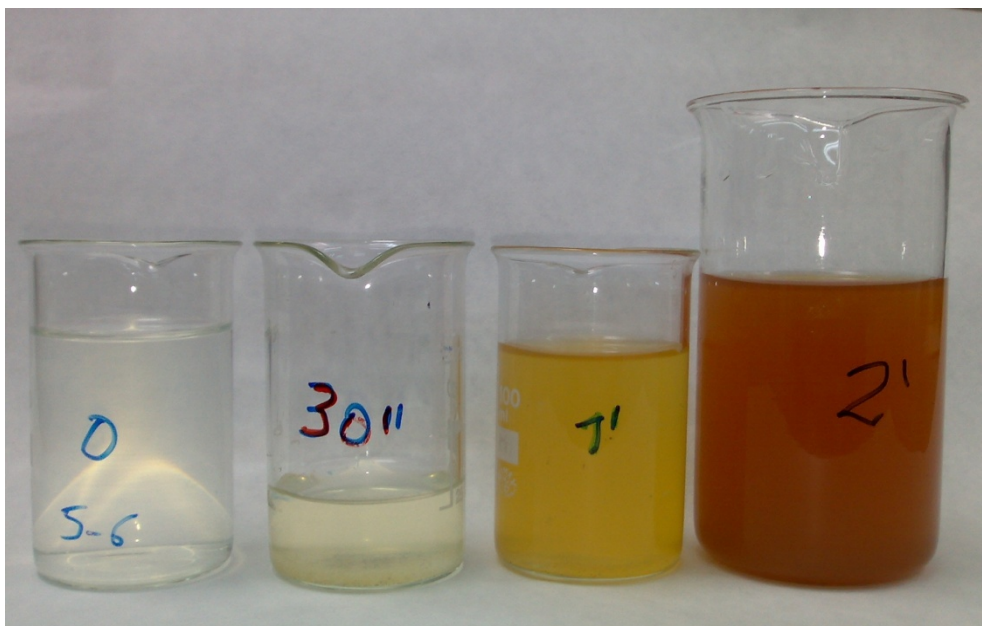


Figura 11: Otro aspecto del agua tratada a 40 V, con electrodos de hierro.

**Experiencia 24 (17-07-08)**

Se trabajó con ensayos en continuo

Tiempo min	Voltaje V	I A	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp °C	pH	Conduct. µS/cm	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	P-PO <sub>4</sub> mg/l
0				26,9	3,61	1674	405	60	32
1	15	3,43		27,4	5,00	1598	390	53	23

Tiempo min	Turbidez NTU	Cobre µg/l	Níquel µg/l	Cromo µg/l
0		4581	1123	90
1	1,73	2596	887	20

**Experiencia 25 (18-07-08)**

Tiempo min	Voltaje V	I A	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp °C	pH	Conduct. µS/cm	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	P-PO <sub>4</sub> mg/l
0				26,6	3,42	1620	395	60	31,5
1,50	15	3,43		27,4	3,94	1670	395	59	28,5

Tiempo min	Turbidez NTU	Cobre µg/l	Níquel µg/l	Cromo µg/l
0		4887	983	155
1,50	0,14	5195	1160	30

**Experiencia 26 (21-07-08)**

Tiempo min	Voltaje V	I A	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp °C	pH	Conduct. µS/cm	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	P-PO <sub>4</sub> mg/l
0	17			26,1	5,76	1669	400	70,5	32
1,50	16	4,09		27,1	6,68	1730	370	70	29
57 s*	25	3,60		26,9	6,30	1710	385	70	31

Tiempo min	Turbidez NTU	Cobre µg/l	Níquel µg/l	Cromo µg/l
0		5033	1280	168
1,50	0,16	402	790	30
57 s*	0,09	635	1073	40

\* Se trabajó con un volumen de 500 ml

**Experiencia 27 (23-07-08)**

Tiempo min	Voltaje V	I A	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp °C	pH	Conduct. µS/cm	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	P-PO <sub>4</sub> mg/l
0				28,0	5,96	1458	395	62,5	32
1,49	15	3,67		29,0	6,52	1465	385	59,5	29
55 s*	25	3.42		29,8	6,29	1455	392	61,5	31,5

Tiempo min	Turbidez NTU	Cobre µg/l	Níquel µg/l	Cromo µg/l
0		5383	1710	170
1,49	7,6 - 0,52	4972	1050	62
55 s*	2,98- 0,29	894	1106	35

\* Se trabajó con un volumen de 500 ml

**Experiencia 28 (23-07-08)**

Se trabajó sin aumentar el pH del agua inicial, caudal 1l/min.

Tiempo min	Voltaje V	I A	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp °C	pH	Conduct. µS/cm	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/l	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	P-PO <sub>4</sub> mg/l
0				28,2	3,64	1468	405	61,0	33,5
1	16	4.09		28,5	3,87	1450	400	60,5	32
1	15	3.82		28,7	3,84	1448	395	59,5	29,5

Tiempo min	Turbidez NTU	Cobre µg/l	Níquel µg/l	Cromo µg/l
0		5708	1033	130
1	1,72 - 0,35	321	643	40
1	5,03- 0,39	4906	963	51

**Experiencia 29 (30-7-08) con agua residual urbana**

Se trabaja en modo batch con agua residual tomada a la salida del decantador primario, y otra muestra tomada a la salida del decantador secundario. Se traen muestras de agua del decantador primario y secundario de la depuradora de Villalba.

El experimento consistió en la variación del voltaje y de la intensidad aplicada en la celda.

**Agua residual del secundario****Experiencia 30 (30-7-08)**

Se comenzó a trabajar con la celda de hierro y con agua del secundario, se observa que el agua está bastante clara. Se introduce un litro de agua aproximadamente en la celda y se fija el equipo a 50 V. Al encenderlo, baja el voltaje a 34 V y trabaja a una intensidad de 4,09 A, y al minuto de tratamiento baja a 33 V y 4,09 A. El agua después se trasvasó de la celda al cono Imhoff, el agua era de color rojizo con muchos flóculos, después de 30 minutos, el volumen sedimentado fue de 15 ml, y se observaban muchos flóculos que no llegaron a sedimentar.

**Experiencia 31 (30-7-08)**

Se trabaja con un tiempo de 3 minutos, se comenzó con 36 V y bajó a 35 V y 4,09 A.

El agua era de color verde oscuro, se trasvasa al cono y de inmediato comienzan a precipitar los flóculos. A los 30 minutos se observa que han quedado flóculos que no han precipitado. El volumen sedimentado fue de 78 ml.

**Experiencia 32 (30-7-08)**

Se trabajó con un tiempo de 6 minutos de electrólisis, el agua resultante fue de color verde oscuro con muchos flóculos, se observa que han quedado flóculos en las proximidades de la pared del cono.

En la tabla siguiente se muestran los resultados de los experimentos.

Tiempo min	Voltaje V	I A	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp °C	pH	Conduct. µS/cm	SS mg/l	Turb. NTU	V30 ml	DQO mg/l
0				24,5	6,77	775	0,002	3,44		130
1	34 – 33	4,09		27,6	7,34	807	0,03	87,1	15	122
3	36 – 35	4,09		29,5	8,57	785	0,018	55,2	78	117
6	36 - 34	4,09		33,7	9,08	739	0,006	33,5	110	117



Figura 12: Agua resultante de color verde oscuro con muchos flóculos

### Agua del secundario

#### Experiencia 33 (31-7-08)

Se vuelve a trabajar con agua del secundario variando el voltaje y el volumen de agua a tratar. Se fija a 15 V fuente de alimentación y da una intensidad de entre 0,72 – 0,73 A, para un tiempo de 2 minutos.

$T^{\circ}i = 23,3$

$T^{\circ}f = 24,7$

pH = 7,18

pH = 7,24

Conductividad = 756

Conductividad = 753

El agua era de color Amarillo naranja, no se observan flóculos, y el volumen sedimentado a los 30 minutos nulo, pero se observa que comienzan a sedimentar ligeramente. No se realizan análisis de este ensayo.

**Experiencia 34 (31-7-08)**

Variamos el tiempo a 4 minutos, 15V y 0,73 A, medio litro de muestra de agua del secundario.

T<sup>°</sup><sub>i</sub> = 23,4

T<sup>°</sup><sub>f</sub> = 25,3

pH = 7,02

pH = 7,35

Conductividad = 766

Cond. = 765

El agua tratada es de color naranja oscuro con poco precipitado. El volumen sedimentado a los 30 minutos fue de 5 ml. No se realizan análisis para este ensayo.

**Experiencia 35 (31-7-08)**

El volumen de agua es de 1 litro, 20 V, y la intensidad ha variado entre 2,22 – 2,27 A, el tiempo de tratamiento fue de 5 minutos.

Tiempo Min	Voltaje V	I A	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp °C	pH	Conduct. µS/cm	SS mg/l	Turb. NTU	V30 ml	DQO
0				23,1	7,01	778	6,00	3,44		130
5	20	2,22		26,4	8,61	759	24,00	43,7	47	120

**Agua del decantador primario****Experiencia 36 (31-7-08)**

Se trabaja con agua del primario, se fija la fuente de alimentación a 35 V, al encenderlo baja a 30 V y 4,09 A. El tiempo de tratamiento fue de 3 minutos. Se observa mucha espuma en la celda. El agua es de color verde oscuro y hay muchos flóculos.

**Experiencia 37 (31-7-08)**

El tiempo de tratamiento es de 6 minutos, 30 V y 4,09 A, se observa mucha espuma en la celda, El agua es de color verde oscuro y hay abundante flóculos.

**Experiencia 38 (31-7-08)**

Se trabaja con la celda aluminio, y con agua del primario. El tiempo de tratamiento es de 1 minuto. Se fija el equipo a 35 V, al encenderlo bajó a 16V y 4,09 A. El agua tratada es de color blanco oscuro y no se observan flóculos. Se trasvasa al cono y se deja decantar. Al cabo de unos minutos se observan que se están formando flóculos, pero ascienden, y se forma una capa en la superficie del agua. A la media hora la capa flotante era de 50 ml. Al mover ligeramente el soporte los flóculos comenzaron a descender.

**Experiencia 39 (31-7-08)**

Se trabaja con la celda de aluminio con un tiempo de tratamiento de 3 minutos, el voltaje varió entre 16 y 17V, 4,09 A. Igual que el ensayo anterior los flóculos suben y forman una capa en la superficie.

**Experiencia 40 (31-7-08)**

Aumentamos el tiempo de tratamiento a 6 minutos, el voltaje varió entre 16 y 18 V, a 4,09 A. Se observa mucha generación de espuma. Los flóculos ascienden, después de media hora los flóculos se desprenden y caen, con lo cual el clarificado vuelve a tener flóculos que van en la muestra a analizar.

## Ensayo con celda de hierro

Tiempo Min	Voltaje V	I A	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp °C	pH	Conduct. µS/cm	SS mg/l	Turb. NTU	V30 ml	DQO mg/l
0				21,8	7,34	973	0,07	50,2		324
3	30	4,09		27,2	8,31	936	0,026	32,2	130	161
6	30 - 31	4,09		30,0	8,60	895	0,018	13,1	250	158

Tiempo min	Voltaje V	Colif. totales	E. coli
0		$3 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^5$
3	30	$27 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$
6	31	$7 \cdot 10^3$	--



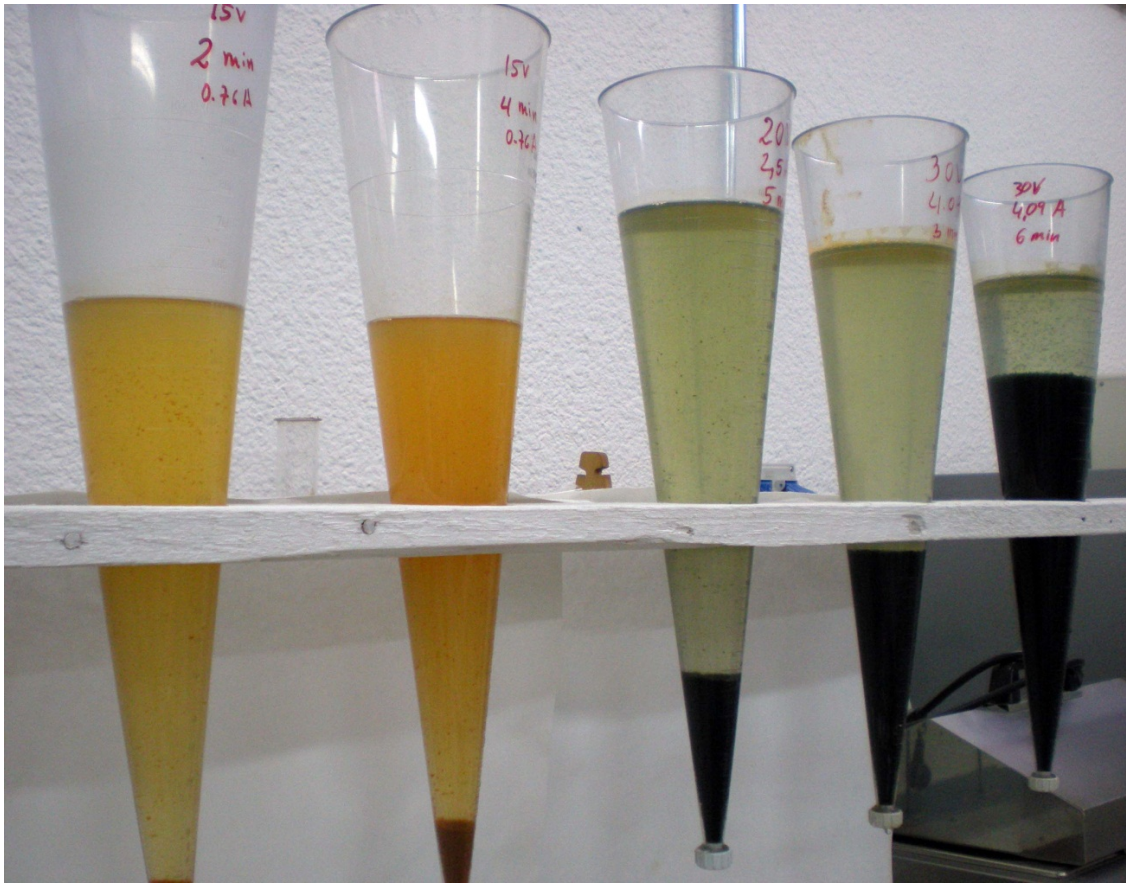


Figura 13: Muestras ensayos con celda de hierro

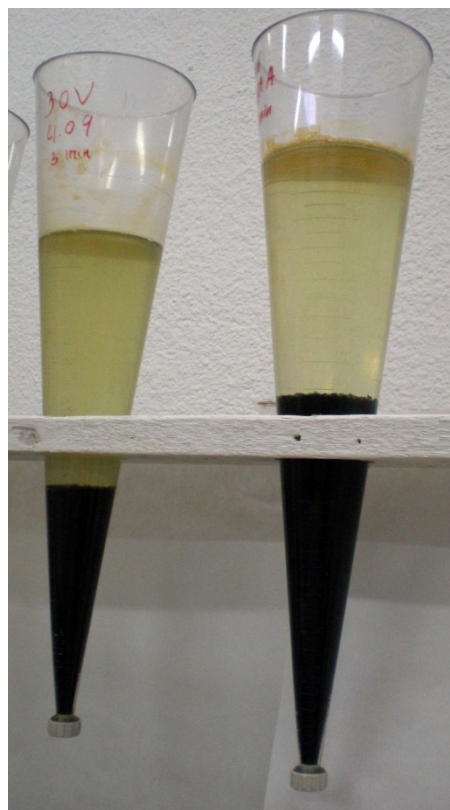


Figura 14: Muestras ensayos con celda de hierro

## Ensayo con celda de aluminio

Tiempo min	Voltaje V	I A	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp °C	pH	Conduct. μS/cm	SS mg/l	Turb. NTU	V30 ml	DQO mg/l
0				23,8	7,39	950	0,07	50,2		324
1	16	4,09		26,3	7,78	932	0,024	9,73	50	169
3	16-17	4,09		27,0	7,96	893	0,026	9,21	75	162
6	16-18	4,09		29,2	8,43	813	0,046	48,4	110	173

Tiempo min	Voltaje V	Colif. totales	E. coli
0		$3 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^5$
3	16	$16,5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$
6	16	$14,4 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$



Figura 15: Muestras ensayos con celda de aluminio

**Experiencia 41 (1-8-08)**

Se trabaja con celda de aluminio y con agua del secundario, el voltaje ha variado entre 20 – 19 V, y una intensidad de corriente de 4,09 A, el tiempo de tratamiento fue de 2 minutos. El agua era de color blanco ligeramente oscuro. Se observa que los flóculos descienden, pero no caen hasta el fondo del cono, es decir sin zona de compresión.

**Experiencia 42 (1-8-08)**

Igual que el ensayo anterior, se observó que la intensidad variaba entre 4,06 – 4,02 A. El tiempo de tratamiento fue de 4 minutos. No se forma la zona de compresión, el clarificado es alto.

**Experiencia 43 (1-8-08)**

El voltaje 20V y 4,09 A, tiempo 6 minutos, no hay zona de compresión, clarificado bueno.

**Experiencia 44 (1-8-08)**

Igual que los ensayos anteriores, 20 V, y la intensidad variaba entre 4,09 – 3,97 A. Tiempo de tratamiento fue de 10 minutos. No se forma la zona de compresión, el clarificado es escaso, el volumen sedimentado a los 30 minutos fue de 650 ml.

## Celda de aluminio (ensayos a – d)

Tiempo Min	Voltaje V	I A	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp °C	pH	Conduct. µS/cm	SS mg/l	Turb. NTU	V30 ml	DQO mg/l
0				22,0	7,32	800	0,006	1,76		82
2	20	4,09		25,2	7,93	766	0,004	0,89	150	70
4	20	4,09		26,2	8,37	726	0,000	0,33	325	46
6	20	4,09		28,3	8,61	688	0,000	0,22	640	86
10	20	4,00		32,6	8,80	643	0.000	0,26	650	80



Figura 16: Muestras ensayos con celda de aluminio

**Experiencia 45 (1-8-08)**

Se trabaja a 10 V, y con una intensidad que variaba entre 1,96-1,93A. Con un tiempo de tratamiento de 4 minutos.

**Experiencia 46 (1-8-08)**

V = 10, I = 1,96 – 1,87 A. El tiempo de tratamiento fue de 6 minutos.

**Experiencia 47 (1-8-08)**

Se trabajó a 15 V y 4 minutos de tiempo de tratamiento, la intensidad de corriente varió entre 3,13 y 3,04 A.

Nota: en ningún ensayo se formó la zona de compresión.

**Resultados**

Tiempo Min	Voltaje V	I A	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp °C	pH	Conduct. µS/cm	SS mg/l	Turb. NTU	V30 ml	DQO mg/l
0				24,9	7,59	795	6,00	1,76		82
4	10	1,93		27,3	8,27	745	4,00	0,68	175	86
6	10	1,87		27,4	8,51	719	0,00	0,49	230	74
4	15	3,04		27,7	8,42	717	0,00	0,43	250	76

**Experiencia 48 (17-9-08)**

Se recogió muestra del río manzanares cerca del Puente de los Franceses a las 9:40 am, se trabaja con la celda de aluminio nº 2, (separación entre placas es de 2,2 cm). El voltaje aplicado es de 20 voltios, y el tiempo de electrólisis son de 2, 4, 6, 10 minutos.

**Experiencia 49 (17-9-08)**

Se trabajó a 20 voltios por un tiempo de 2 minutos, la intensidad entre 1,65 – 1,68. Se observa que los flóculos no llegan a compactarse.

**Experiencia 50 (17-9-08)**

Se trabajó a 20 voltios por un tiempo de 4 minutos, la intensidad entre 1,39 – 1,67. Se observa que los flóculos no llegan a compactarse.

**Experiencia 51 (17-9-08)**

Se trabajó a 20 voltios por un tiempo de 6 minutos, la intensidad entre 1,59 – 1,69. Se observa que los flóculos no llegan a compactarse en el fondo del cono.

**Experiencia 52 (17-9-08)**

Se trabajó a 20 voltios por un tiempo de 10 minutos, la intensidad entre 1,59 – 1,64. De igual forma que en los casos anteriores se observa que los flóculos no llegan a compactarse.

Tiempo Min	Voltaje V	I A	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp °C	pH	Conduct. µS/cm	SS mg/l	Turb. NTU	V30 ml	DQO mg/l
0				20,5	7,20	550	20	11,2		27
2	20	1,67		23,5	7,67	553	20	2,00	72	20
4	20	1,69		23,8	8,03	531	8	1,23	115	18
6	20	1,70		24,5	8,28	519	4	0,98	190	24
10	20	1,67		25,7	8,49	497	0	0,34	320	23

**Ensayos del 18-09-2008**

Se trabaja con la celda de aluminio nº 2. El voltaje aplicado es de 15 voltios, y el tiempo de electrólisis son de 2, 4, 6, 10 minutos.

**Experiencia 53 (18-9-08)**

Se trabajó a 15 voltios por un tiempo de 2 minutos, la intensidad fue de 1,27. Se observa que hay muy pocos sólidos y muy ligeros, a los 30 minutos de sedimentación no llegan a compactarse en el fondo del cono.

**Experiencia 54 (18-9-08)**

Se trabajó a 15 voltios por un tiempo de 4 minutos, la intensidad entre 1,03 – 1,24. Se observa que los flóculos no llegan a compactarse.

#### **Experiencia 55 (18-9-08)**

Se trabajó a 15 voltios por un tiempo de 6 minutos, la intensidad entre 1,05 – 1,23. Se observa que los flóculos no llegan a compactarse en el fondo del cono.

#### **Experiencia 56 (18-9-08)**

Se trabajó a 15 voltios por un tiempo de 10 minutos, la intensidad entre 1,17 – 1,21. De igual forma que en los casos anteriores se observa que los flóculos no llegan a compactarse.

Tiempo Min	Voltaje V	I A	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp °C	pH	Conduct. µS/cm	SS mg/l	Turb. NTU	V30 ml	DQO mg/l
0				17	7,14	423	18	10,9		31
2	15	1,27		21	7,57	424	10	2,71	40	24
4	15	1,24		21,4	7,98	416	8	0,78	84	18
6	15	1,23		22,3	8,19	406	6	0,61	135	17
10	15	1,23		23,1	8,48	391	4	0,41	210	20

#### **Ensayos del (23-9-08)**

Se trajo muestra del río manzanares cerca del Puente de los Franceses a las 9:40 am, se trabaja con la celda de aluminio nº 2. Dos días antes (21) había llovido. El voltaje aplicado es de 10 voltios, y el tiempo de electrólisis son de 2, 4, 6, 10 minutos.

#### **Experiencia 57 (23-9-08)**

Se trabajó a 10 voltios por un tiempo de 2 minutos, la intensidad ha variado entre 0,57 – 0,74. A los 30 minutos hay flóculos finos en el sobrenadante y los flóculos que llagaron a coagularse han subido a la superficie.

#### **Experiencia 58 (23-9-08)**

Se trabajó a 10 voltios por un tiempo de 4 minutos, la intensidad variaba entre 0,53 – 0,73. Los flóculos han ascendido formando una capa superficial de 50 ml. No se realizaron ensayos.

**Experiencia 59 (23-9-08)**

Se trabajó a 10 voltios por un tiempo de 6 minutos, la intensidad variaba entre 0,73 – 0,74. Se observa que los flóculos no llegan a compactarse en el fondo del cono.

**Experiencia 60 (23-9-08)**

Se trabajó a 20 voltios por un tiempo de 10 minutos, la intensidad variaba entre 0,52 – 0,69. De igual forma que en los casos anteriores se observa que los flóculos no llegan a compactarse.

Tiempo min	Voltaje V	I A	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp °C	pH	Conduct. µS/cm	SS mg/l	Turb. NTU	V30 ml	DQO mg/l
0				20,9	7,06	399	20	13,7		43
2	10	0,73		22,9	7,34	399	-	-	0	-
4	10	0,73		22,8	7,56	397	8	3,23	50	21
6	10	0,73		23,2	7,64	390	14	3,83	100	20
10	10	0,69		24,2	8,31	376	8	1,10	175	15

**Experiencias 24-09-2008**

Se trabajó con la celda nº 3 (separación entre placas es 3,1 cm).

Se trabaja con el agua del río Manzanares recogido el día 23. El voltaje aplicado es de 20 voltios, y el tiempo de electrólisis son de 2, 4, 6, 10 minutos.

**Experiencia 61 (24-9-08)**

Se trabajó a 20 voltios por un tiempo de 2 minutos, la intensidad variaba entre 0,46 y 0,65. Se observa que es agua que sale de la celda está turbia, no se aprecian flóculos, al cabo de 15 minutos se forman los flóculos que ascienden, a los 30 minutos hay flotantes ligeros y flóculos dispersos en el sobrenadante.

**Experiencia 62 (24-9-08)**

Se trabajó a 20 voltios por un tiempo de 4 minutos, la intensidad varió entre 0,51 – 0,66. Igual que el ensayo 1, pero hay menos flóculos en el sobrenadante.

**Experiencia 63 (24-9-08)**

Se trabajó a 20 voltios por un tiempo de 6 minutos, la intensidad entre 0,47 – 0,67. Igual que en los casos anteriores, hay flotantes que abomban en el centro y ligero movimiento comienzan a caer.

**Experiencia 64 (24-9-08)**

Se trabajó a 20 voltios por un tiempo de 10 minutos, la intensidad entre 0,50 – 0,71. De igual forma que en los casos anteriores se observa que hay flóculos muy finos en el sobrenadante y 6 ml de precipitados y los sólidos que hay en la superficie van cayendo conforme pasa el tiempo de sedimentación.

El agua tenía flóculos muy pequeños que no llegan a decantar, no se realizaron análisis de sólidos.

Tiempo min	Voltaje V	I A	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp °C	pH	Conduct. µS/cm	SS mg/l	Turb. NTU	V30 ml	DQO mg/l
0				16,1	7,16	399	-	11,8		30
2	20	0,65		19,6	7,23	400	-	12,1	0	41
4	20	0,66		19,9	7,25	391	-	5,22	-	27
6	20	0,67		20,3	7,64	387	-	4,41	-	28
10	20	0,71		21,3	7,95	379	-	5,75	-	23

**Experiencias 30-09-2008****Experiencia 65 (30-9-08)**

Se trabajó a 35 voltios por un tiempo de 2 minutos, la intensidad variaba entre 1,49 y 1,63. Se observa que es agua que sale de la celda está turbia, y comienzan a formarse los flóculos, a los 30 minutos hay flóculos en suspensión.

**Experiencia 66 (30-9-08)**

Se trabajó a 35 voltios por un tiempo de 4 minutos, la intensidad varió entre 1,22 – 1,43. El agua esta bastante clara, los sedimentos no llegan a compactarse.



**Experiencia 67 (30-9-08)**

Se trabajó a 35 voltios por un tiempo de 6 minutos, la intensidad entre 1,37 – 1,79. Igual que en los casos anteriores, los sedimentos no se compactan y son de color marrón oscuro.

**Experiencia 68 (30-9-08)**

Se trabajó a 35 voltios por un tiempo de 10 minutos, la intensidad entre 1,56 – 1,69. De igual forma que en los casos anteriores se observa que los flóculos no se compactan en el fondo del cono. Los flóculos son de color pardo oscuro y llegan a la mitad del cono.

Tiempo min	Voltaje V	I A	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp °C	pH	Conduct. µS/cm	SS mg/l	Turb. NTU	V30 ml	DQO mg/l
0				19,5	7,13	468	18	8,98		23
2	35	1,63		22,0	7,77	467	18	3,07	60	21
4	35	1,43		22,2	7,94	452	14	2,00	110	19
6	35	1,79		23,6	8,34	454	10	1,30	200	15
10	35	1,69		25,3	8,62	418	8	0,67	270	14

**Experiencias 2-10-08****Experiencia 69 (2-9-08)**

Se trabajó a 50V y 75V.

Tiempo min	Voltaje V	I A	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp °C	pH	Conduct. µS/cm	SS mg/l	Turb. NTU	V30 ml	DQO mg/l
0				17,9	7,04	414	12	14,4		19
2	50	2,22		21,5	7,80	409	4	2,50	86	18
4	50	2,16		22,8	8,13	382	4	1,24	150	8
6	50	2,02		24,4	8,35	371	0	0,55	220	12
10	50	2,18		27,3	8,54	352	2	0,46	330	10

Tiempo min	Voltaje V	I A	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp °C	pH	Conduct. µS/cm	SS mg/l	Turb. NTU	V30 ml	DQO mg/l
0				17,9	7,04	414	12	14,4		19
2	75	3,42		24,9	8,16	402	6	1,02	120	15
4	75	3,51		28,4	8,35	372	4	0,44	225	13
6	75	3,32		30,1	8,46	362	4	0,51	285	6
10	75	3,51		25,3	8,62	339	4	0,37	390	6

**Experiencias 7-10-2008****Experiencia 70 (7-10-08)**

Se cambia de reactor, se trabaja con el nº 4 (separación entre placas 4,78 cm), se trabajó a 75V, 100V, y 150V.

Tiempo min	Voltaje V	I A	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp °C	pH	Conduct. µS/cm	SS mg/l	Turb. NTU	V30 ml	DQO mg/l
0				15,8	7,18	379	16	12,4		23
2	75	1,34		19,9	7,81	379	10	2,18	75	18
4	75	1,37		21,3	8,22	374	8	1,31	100	13
6	75	1,40		22,8	8,33	368	8	1,07	150	7
10	75	1,47		25,6	8,56	356	8	0,80	240	10

Tiempo min	Voltaje V	I A	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp °C	pH	Conduct. µS/cm	SS mg/l	Turb. NTU	V30 ml	DQO mg/l
0				18,0	7,50	385	16	12,4		23
2	100	1,93		22,4	8,17	379	12	2,22	74	12
4	100	1,96		23,8	8,34	371	8	1,18	135	7
6	100	1,99		26,0	8,44	364	6	0,76	200	7
10	100	2,20		31,7	8,50	354	8	0,29	310	7

**Experiencia 71 (8-10-08)**

Tiempo min	Voltaje V	I A	I/S A/m <sup>2</sup>	Temp. °C	pH	Conduct. µS/cm	SS mg/l	Turb. NTU	V30 ml	DQO mg/l
0				14,5	7,65	377	18	12,8		20
2	150	2,88		21,5	8,14	375	10	1,16	125	17
4	150	3,04		27,3	8,36	366	2	0,50	180	16
6	150	3,44		34,4	8,40	364	4	0,22	260	11
10	150	4,03		47,0	8,42	357	2	0,24	330	9

**Experiencia 72 (8-10-08)**

Se muestran los resultados obtenidos mediante electrocoagulación utilizando una celda de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas

Tabla Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas.

Tiempo min	Voltaje V	I/S A/m <sup>2</sup>	Temperatura °C	pH	Conductividad μS/cm	N-NO <sub>3</sub> mg/l
0	40,3	31,14	15,8	6,15	1375	47
1	35,0	31,14	17,2	10,28	1271	27
3	35,3	31,14	22,7	10,39	1167	22
6	33,9	31,14	25,0	10,47	1025	15

**Experiencia 73 (12-10-08)**

Se muestran los resultados obtenidos mediante electrocoagulación utilizando una celda de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas en la eliminación de metales y fósforo

Tabla Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas.

Tiempo seg	Voltaje V	Temp. °C	pH	Conduct μS/cm	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> mg/l	Cu μg/l	Ni μg/l	Cr μg/l
0	10	19.9	3.65	900	31.4	2115	1082	72.7
30	10	20.4	4.60	859	24.6	419	730	10.7
60	11	21.6	6.10	754	10.6	88	440	6.0
120	11	22.5	8.38	7.04	4,0	8	330	6.0

**Experiencia 74 (12-10-08)**

Se muestran los resultados obtenidos mediante electrocoagulación utilizando una celda de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas en la eliminación de metales y fósforo.

Tabla Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas.

Tiempo seg	Voltaje V	Temp. °C	pH	Conduct μS/cm	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> mg/l	Cu μg/l	Ni μg/l	Cr μg/l
0	15	21.7	3.59	933	32.6	2998	3845	85.7
30	15	22.1	4.85	835	21.0	1307	2000	8.4
60	15	22.3	6.85	761	9.0	24	301	6.1
120	15	22.8	8.64	723	4.2	27	32	6.1

**Experiencia 75 (14-10-08)**

Se muestran los resultados obtenidos mediante electrocoagulación utilizando una celda de hierro en la eliminación de metales y fósforo

Tabla Resultados del agua tratada con reactor de hierro de 2,2 cm de separación entre placas.

Tiempo seg	Voltaje V	Temp. °C	pH	Conduct. $\mu\text{S/cm}$	$\text{PO}_4^{-3}$ mg/l	Cu $\mu\text{g/l}$	Ni $\mu\text{g/l}$	Cr $\mu\text{g/l}$	Zn $\mu\text{g/l}$
0	10	20.0	3.28	750	24.8	4142	1300	111	1580
30	10	20.3	5.26	662	19.5	45	875	11	600
60	10	20.8	6.16	575	12.8	207	287	7	130
120	10	21.5	8.90	538	6.6	105	133	4	30

#### Experiencia 76 (14-10-08)

Se muestran los resultados obtenidos mediante electrocoagulación utilizando una celda de hierro en la eliminación de metales y fósforo.

Tabla Resultados del agua tratada con reactor de hierro de 2,2 cm de separación entre placas.

Tiempo Seg	Voltaje V	Temp. °C	pH	Conduct. $\mu\text{S/cm}$	$\text{PO}_4^{-3}$ mg/l	Cu $\mu\text{g/l}$	Ni $\mu\text{g/l}$	Cr $\mu\text{g/l}$	Zn $\mu\text{g/l}$
0	22	21.1	5.27	1430	45,5	4260	828	43	1560
30	23	22.0	5.52	1442	16,0	381	718	0,0	1300
60	23	23.2	6.40	1461	8,0	28	283	0,7	550
120	23	24.5	8.91	1492	8,0	228	123	2,0	340

#### Experiencia 77 (15-10-08)

Se muestran los resultados obtenidos mediante electrocoagulación utilizando una celda de hierro en la eliminación de metales y fósforo

Tabla Resultados del agua tratada con reactor de hierro de 2,2 cm de separación entre placas.

Tiempo seg	Voltaje V	Temp. °C	pH	Conduct $\mu\text{S/cm}$	$\text{PO}_4^{-3}$ mg/l	Cu $\mu\text{g/l}$	Ni $\mu\text{g/l}$	Cr $\mu\text{g/l}$	Zn $\mu\text{g/l}$
0	31	20.1	5.12	665	30,2	3851	1220	82	1580
30	31	21.6	5.40	592	19,6	1043	617	13	1230
60	31	22.8	5.56	536	15,4	39	340	1	370
120	31	24.5	6.40	507	12,3	218	107	2	40

#### Experiencia 78 (15-10-08)

Se muestran los resultados obtenidos mediante electrocoagulación utilizando una celda de hierro en la eliminación de metales y fósforo

Tabla Resultados del agua tratada con reactor de hierro de 2,2 cm de separación entre placas.

Tiempo seg	Voltaje V	Temp. °C	pH	Conduct $\mu$ S/cm	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> mg/l	Cu $\mu$ g/l	Ni $\mu$ g/l	Cr $\mu$ g/l	Zn $\mu$ g/l
0	40	20.3	4.73	640	30,25	3953	953	66	1600
30	40	22.4	5.30	545	15,75	116	791	0,3	720
60	40	24.0	5.80	480	10,50	195	450	0,1	700
120	40	26.0	6.82	450	8,25	374	104	0,8	530

### Experiencia 79 (16-10-08)

Se muestran los resultados de los rendimientos obtenidos en la eliminación de microorganismos mediante electrocoagulación, utilizando celda de aluminio a 16,5 V.

Tabla Resultados de eliminación de microorganismos, con electrodos de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas

Tiempo (min)	Voltaje (V)	Colif. Totales (UFC/ 100 ml)	E. coli (UFC/ 100 ml)
0	16,6	$26,5 \cdot 10^4$	$72 \cdot 10^3$
3	16,5	$16,7 \cdot 10^4$	$39 \cdot 10^3$
6	16,5	$11,2 \cdot 10^4$	$23 \cdot 10^3$

### Experiencia 80 (16-10-08)

Se muestran los resultados de los rendimientos obtenidos en la eliminación de microorganismos mediante electrocoagulación, utilizando celda de aluminio a 50 V

Tabla Resultados de eliminación de microorganismos

Tiempo (min)	Voltaje (V)	Colif. Totales (UFC/ 100 ml)	E. coli (UCF/100 ml)
0	50	$35 \cdot 10^3$	$4,5 \cdot 10^3$
3	50	$18,5 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$

### Experiencia 81 (17-10-08)

Se muestran los resultados de los rendimientos obtenidos en la eliminación de microorganismos mediante electrocoagulación, utilizando celda de hierro a 30 - 31 V

Tabla Resultados del agua tratada con reactor de hierro de 2,2 cm de separación entre placas

Tiempo (min)	Voltaje (V)	Colif. Totales (UFC/ 100 ml)	E. coli (UFC/ 100 ml)
0		$3 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^5$
3	30	$2,7 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^3$
6	31	$7 \cdot 10^3$	< 1000

**Experiencia 82 (17-10-08)**

Se muestran los resultados de los rendimientos obtenidos en la eliminación de microorganismos mediante electrocoagulación, utilizando celda de aluminio 16 V

Tabla Resultados del agua tratada con reactor de aluminio de 3,1 cm de separación entre placas

Tiempo (min)	Voltaje (V)	Colif. Totales (UFC/ 100 ml)	E. coli (UFC/ 100 ml)
0		$3 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^5$
3	16	$1,65 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^4$
6	16	$1,44 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^4$

**Experiencia 83 (18-10-08)**

Se muestran los datos antes y después del tratamiento mediante electrocoagulación, utilizando una celda con placas de aluminio de 1,4 cm de separación entre placas.

Se muestran los datos obtenidos con la celda de hierro de 2,2 cm de separación entre placas.

Tabla Resultados obtenidos con placas de aluminio

Tiempo min	Voltaje V	I A	Temp °C	pH	Conduct. $\mu$ S/cm	Dureza Total mg/l	Dureza Cálctica mg/l	Alcalinidad mg/l
0	10		12,3	8,00	2001	526	208,0	234
2	10	3,33	17,6	7,41	1975	486	190,4	187

**Experiencia 84 (18-10-08)**

Tabla Resultados obtenidos con placas de hierro

Tiempo min	Voltaje V	I A	Temp °C	pH	Conduct. $\mu$ S/cm	Dureza Total mg/l	Dureza Cálctica mg/l	Alcalinidad mg/l
0	10		12,3	8,00	2001	526	208,0	234
2	10	2,79	16,9	7,99	1992	482	192,8	185

**Experiencia 84 (19-10-08)**

Se muestran los resultados obtenidos en la reducción de la dureza total, dureza cálcica y alcalinidad, utilizando electrodos de aluminio.

Tabla Resultados obtenidos con placas de aluminio

Voltaje V	I A	Temp. °C	pH	Conductividad ( $\mu$ S/cm)	Dureza Total (mg/l)	Dureza Cálcica (mg/l)	Alcalinidad (mg/l)
0		18,5	7,95	1961	310	204	227
10	3,20	20,2	7,49	1935	140	196	190
12	4,04	20,7	7,30	1897	130	192	173

**Experiencia 85 (19-10-08)**

Se muestran los resultados obtenidos en la reducción de la dureza total, dureza cálcica y alcalinidad, utilizando electrodos de hierro, variando el voltaje, a 10 V y 14 V

Tabla Resultados obtenidos con placas de hierro.

Tiempo min	Voltaje V	I A	Temp °C	pH	Conduct. $\mu$ S/cm	Dureza Total mg/l	Dureza Cálcica mg/l	Alcali- nidad mg/l
0	10		12,3	8,00	2001	526	208,0	234
2	10	2,79	16,9	7,99	1992	482	192,8	185

**Experiencia 86 (19-10-08)**

Tabla Resultados obtenidos con placas de hierro.

Tiempo min	Voltaje V	I A	Temp °C	pH	Conduct. $\mu$ S/cm	Dureza Total mg/l	Dureza Cálcica mg/l	Alcali- nidad mg/l
0	15		18,5	7,95	1961	310	204,0	227
2	14	4,04	20,7	8,17	1923	220	196,0	200

**1.3. Tercera fase**

En definitiva, en el año 2008, se han realizado los ensayos de electrocoagulación a nivel laboratorio en sistemas por lotes, terminando la denominada Fase 1ª. Con los resultados

obtenidos se ha diseñado una planta piloto, a nivel de planta semi- industrial, que constituye la Fase 2ª.

La Fase 3ª comienza con la construcción e instalación de la Planta proyectada, realizándose las pruebas de funcionalidad de la misma.

En esta fase se realizaron la petición y gestión para poder instalar la planta piloto en la depuradora de Viveros de la Villa. Desgraciadamente se tardó un largo tiempo en lograr dicha autorización.

El 23 junio del 2009 me comunican, por parte del Canal de Isabel II, la aprobación del borrador del convenio, y me solicitan datos complementarios. El tiempo fue pasando entre envío de documentos entre el Canal y el Rectorado.

Finalmente el 10 de Septiembre del 2009 se firma el convenio entre el Canal de Isabel II y la universidad Politécnica de Madrid, para la instalación de la planta piloto y la realización de ensayos.

Octubre - Diciembre 2009, compra de equipos y materiales de la planta piloto

Enero – Febrero 2010, recepción de los equipos, materiales y reactivos de la planta piloto

Marzo – Abril 2010, traslados de equipos y materiales, montaje de la planta piloto en la depuradora de Viveros de la Villa.

Mayo 2010, ensayos de estanqueidad y reparaciones de las fugas, cambio de bombas, sellado de las celdas de reactivos y tanques de almacenamiento de agua que alimenta al reactor.

25-05-2010

Se llenó el tanque de alimentación 1 con agua que sale del decantador secundario. Se tarda 47 minutos en llenar. Una vez llena se procedió a poner en funcionamiento la bomba de impulsión a la celda nº 2'



**Experiencia 87****Experimentación con la celda nº 2 con placas de aluminio**

Las separaciones entre el primer par de placas es de 4,76; 4,66 la distancia entre placas promedio es 4,71 cm, la primera es (-) y la segunda (+), y entre ellas hay una placa de aluminio sin corriente (no conductora). Después del polo (+) anterior, hay una placa sin corriente, luego otra placa polo (-), placa sin corriente y viene el polo (+), el segundo par formado por positivo anterior y negativo del siguiente, la separación entre placas es 4,52; El tercer par tiene una distancia entre placas de 4,31; 4,41 cm, y la distancia promedio entre placas es de 4,37 cm.

La distribución era:

(-) / (+) / (-) / (+)

La celda electrolítica se llena en 20 minutos

Se trabaja en continuo, el caudal medio de entrada fue de 137,1 l/h y el caudal medio de salida fue de 138,4 l/h. El índice volumétrico a los 30 minutos (V30) = 26 ml.

Se conectan las 2 fuentes de alimentación en la celda. La fuente nº 1 inicia con un voltaje de 154 V y una intensidad de 4,02 A. Durante la experimentación, que duró 45 minutos, la intensidad ha variado desde 4,92 – 4,98 A y el voltaje de 189 151 V. La fuente nº 2 se inicia con un voltaje de 187 V y 4,13 A, durante los 45 minutos de experimentación ha variado 4,63 A y 187 V a 4,72 A y 187 V.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	21,2	7,14	5,78	839	6,22	32	0,65	22	0,49	46
Salida	22,5	7,53	-	822	1,78	23	0,0	16	2,72	23

**Experiencia 88****Experimentación trabajando con la celda 1 con placas de acero.**

Se trasladan las pinzas de la celda 2 a la celda 1. Se coloca de la siguiente manera:

(+) / (-) / (+) / (-)

Las separaciones entre el primer par de placas conductoras es de 4,76; 4,66 cm; la distancia entre placas promedio es 4,71 cm, la primera es (+) y la segunda (-), y entre ellas hay una placa de acero sin corriente (no conductora). Luego, el segundo par formado por el polo (-) anterior y el polo (+) del siguiente tiene una separación promedio de 4,56 cm, en el medio hay una placa sin corriente. Posteriormente, el siguiente par, que va conectada a la otra fuente de alimentación, tiene una distancia entre placas de 4,70; 4,50; 4,12 cm, y la distancia promedio entre placas es de 4,44 cm, la disposición es: (+) (-) y entre ellas hay una placa conductora.

La celda se tarda en llenar 20 minutos aproximadamente

El caudal de entrada a la celda es de 143,3 l/h y de salida al decantador es de 144 l/h.

Igual que en caso anterior, se conectaron las 2 fuentes de alimentación en la celda. La fuente nº 1 se inicia con un voltaje de 33 V y una intensidad de 4,98 A. Durante la experimentación, que duró 35 minutos, la intensidad casi no varía 4,97A y el voltaje de 32V. La fuente nº 2 se inicia con un voltaje de 36 V y 4,99 A. Y a los 35 minutos de experimentación fue de 4,99 A y 35V.

A los 30 minutos el índice volumétrico fue cero, no ha coagulado y el agua era de color rojizo.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	21,9	7,33	6,65	847	6,22	32	0,65	22	46
Salida	21,9	7,44	-	821	8,61	22,5	0,4	15	23

### Experiencia 89. 27 – 05- 2010

Se comenzó la experimentación a las 9 horas30 minutos. Se conectan las bombas de alimentación y el tanque se llena a las 10:40 minutos.

La celda se tarda en llenar 20 minutos aproximadamente

El caudal de entrada a la celda es de 143,3 l/h y de salida al decantador es de 144 l/h.

Igual que en caso anterior, se conectaron las 2 fuentes de alimentación en la celda. La fuente nº 1 se inicia con un voltaje de 33 V y una intensidad de 4,98 A. Durante la experimentación,

que duró 35 minutos, la intensidad casi no varió 4,97A y el voltaje de 32V. La fuente nº 2 se inicia con un voltaje de 36 V y 4,99 A. Y a los 35 minutos de experimentación fue de 4,99 A y 35V.

A los 30 minutos el índice volumétrico fue cero, no ha coagulado y el agua era de color rojizo.

Se trabajó con la celda 2, que contiene placas de aluminio.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	21,0	6,90	5,56	751	3,57	5,5	0,4	12	0,49	37,5
Salida	26,3	8,09	7,28	777	1,64	5,0	0,0	9	2,72	25

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$5,6 \times 10^5$	$5,5 \times 10^4$
Salida	$3,8 \times 10^3$	$2 \times 10^2$

#### Experiencia 90. 28-05-2010

Se comienza el llenado del depósito de alimentación 1 a las 9:45 minutos con las bombas 1 y 4.

Disposiciones de las placas:

(+) / (-) / (+) / (-)

El caudal medio de entrada a la celda es de 133,33 l/h.

Se fijan las fuentes de alimentación de la siguiente manera:

F1: 4,98 A, 156 V, se observa que baja inmediatamente la tensión 119 V y se mantiene los 4,98A. Transcurridos los 5 minutos el voltaje era de 118 V, a los 15 min 118 V, a los 25 min 119 voltios.

F2: 4,99 A, 85 V, se observa que baja inmediatamente la tensión a 80 V. Después de los 5 min la tensión era 79 V, y permaneció constante hasta los 30 minutos que dura la experimentación.

Se extraen dos muestras para el cono Imhof y se dejan en reposo 30 min, transcurrido ese tiempo, se tiene un índice volumétrico a los 30 minutos de 32 ml, y de 30 ml.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	20,7	6,93	5,93	731	5,70	5,5	0,6	16	0,13	48
Salida	24,4	7,50	5,22	749	1,56	3,0	0,0	10	2,62	17

Experimentación con placas de acero.

Se disponen las placas de la siguiente manera: (-) / (+) / (-) / (+), primero se colocan las pinzas de la fuente nº 2, luego las pinzas de la fuente nº 1. Se observa que salen burbujas de la placa conductora. Hay generación de espumas, a la entrada el color del agua es verdoso y a la salida de color amarillo.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	21,2	6,83	5,99	754	5,70	5,5	0,6	16	48
Salida	22,1	7,34	9,22	766	3,74	4,0	0,0	16	15,5

#### Experiencia 91. 31 – 05 – 2010

Se comienza llenando el depósito de alimentación1 a las 9,25 con las 2 bombas, el agua que entra a la planta de observa bastante turbia, en comparación con otros días.

La disposición de las pinzas son: fuente 2 (-) / (+) / fuente 1 (-) / (+).

Se trabaja con celda de aluminio

Las distancias entre las placas donde se ubican las pinzas son:

Par (1-3) 4,78; 5,1; 4,99; 5,14; 5,14 = 5,03 cm. Par (3-5) 4,55; 4,58; 4,52; 4,64 = 4,57 cm promedio

Par (5-7) 4,19; 4,48; 4,49 = 4,39 cm en promedio.

Distancias entre placas de electrodo y conductora:

Par (1-2) 2,45; 2,55 = 2,50 cm en promedio

Par (2-3) 2,26; 2,33; 2,26 = 2,28 cm en promedio

Par (3-4) 2,43; 2,00; 2,00 = 2,14 cm en promedio

Par (4-5) 2,00; 2,00; 2,00 = 2,00 cm en promedio

Par (5-6) 1,96; 2,21; 2,32 = 2,16 en promedio

Par (6-7) 2,21; 1,98; 2,14 = 2,11 en promedio

Se comienza el llenado de la celda de electrocoagulación a la 10:12 am.

Se fija la intensidad en las fuentes de alimentación.

Fuente 1: 4,99 A y 126V; 4,99 A y 103 V; inicio de la EC 4,99 A y 81V, al final de la experimentación 4,98 A y 69 V.

Fuente 2: 4,99 A y 81 V; 4,99 A y 76 V, inicio de la EC 4,99 A y 70 V, al final de la experimentación 4,99 A y 67 V.

Caudal promedio = 131, 47 l/h

Índice volumétrico V30 = 27 ml se observa gran cantidad de flóculos dispersos

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	22,1	7,10	5,76	803	8,30	25	1,5	30	0,17	66
Salida	23,2	7,79	6,72	822	1,77	15,5	0,15	9	2,23	16

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$1,18 \times 10^6$	$7,0 \times 10^5$
Salida	$1,58 \times 10^4$	$1,9 \times 10^3$

### Experimentación con celda de acero

Disposición de las pinzas: F1: (+) / (-), F2: (+) / (-)

Distancias entre pares de electrodos:

Par (1-3) 4,91; 5,00; 4,89 = 4,93 cm en promedio

Par (3-5) 4,60; 4,50; 4,48 = 4,52 cm en promedio

Par (5-7) 4,44; 4,60; 4,90 = 4,65 cm en promedio

Se fijan los voltajes y las intensidades de las fuentes de alimentación:

F1: 6,99 A y 49 V al final de la experimentación 6,99 A y 47 V.

F2: 6,99 A y 45 V al final de la experimentación 6,99 A y 43 V.

Índice volumétrico V30 = 12 ml. Gran cantidad de flocúlos en suspensión.

El caudal promedio 143,95 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	23	7,16	5,46	834	8,30	25	1,5	30	66
Salida	25,2	7,61	8,46	847	4,73	18,5	0,1	12	26,5

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$1,18 \times 10^5$	$7,0 \times 10^5$
Salida	$1,75 \times 10^4$	$3,9 \times 10^3$

### 1-15 Junio 2010, Primeros ensayos choques en planta piloto

#### Experiencia 92. 1 – 06 – 2010

Electrodos de aluminio

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	23,2	7,50	6,02	920	11,8	30	2,0	41	0,14	81,5
Salida	25,2	8,17	5,28	923	1,44	27	0,1	3	2,63	3

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$2,69 \times 10^5$	$4,6 \times 10^5$
Salida	$3,12 \times 10^4$	$7,25 \times 10^3$

Electrodos de acero

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduc. t. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	23,0	7,35	4,88	871	11,8	30	2,0	41	81,5
Salida	25,0	7,86	8,49	849	2,15	26,5	0,1	7	30,5

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$2,69 \times 10^5$	$4,6 \times 10^5$
Salida	$5,85 \times 10^4$	$1,96 \times 10^4$

### Experiencia 93. .10-6-2010

#### Nuevas placas

Se han colocado nuevas placas de aluminio, las distancias entre placas electrodos con una placa conductora intermedia son:

Placas electrodo, 1-3: 4,86; 4,69; 4,70 = 4,75 cm, se han colocado las pinzas de la fuente F1.

Placas electrodo 5-7: 4,72 cm, se han colocado las pinzas de la fuente F2

Se fijan a 5 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
4,98 A	50 V	4,99 A	53 V	1 seg
4,98 A	49 V	4,99 A	52 V	10 min
4,97 A	50 V	4,99 A	52 V	20 min
4,97 A	50 V	4,99 A	53 V	30 min
4,97 A	51 V	4,99 A	53 V	40 min

El caudal promedio de entrada y salida de la celda es de 133,8 l/h.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	20,6	7,06	6.85	541	2,85	3	0,5	N.A	66
Salida	22,1	7,80	4,68	516	0,95	1	0,0	N.A	24

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$5,9 \times 10^5$	$3,26 \times 10^4$
Salida	$6,5 \times 10^2$	$2,0 \times 10^2$

**Experiencia 93. 11-6-2010**

Distancia entre electrodos

1-3: 4,76; 4,71 = 4,735 cm posiciones (+)/(-)

5-7: 4,74; 4,78 = 4,76 cm, Posiciones (+)/(-)

Se fijan a 5 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
4,98 A	46 V	4,99 A	49 V	1 seg
4,98 A	46 V	4,98 A	48 V	2 min
4,98 A	46 V	4,99 A	48 V	10 min
4,97 A	45 V	4,99 A	48 V	20 min
4,97 A	46 V	4,99 A	48 V	45 min
4,97 A	46 V	4,99 A	48 V	55 min

El caudal promedio es 133,47 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	20,2	7,00	7,22	591	3,04	5	0,7	10,5	0,02	42
Salida	22,1	7,69	4,83	574	1,15	4	0,0	9,5	0,525	21

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$4,4 \times 10^5$	$1,67 \times 10^4$
Salida	$1,55 \times 10^3$	$2,0 \times 10^2$

**Experiencia 94. 14-6-2010****Aluminio**

Distancia entre electrodos

1-3: 4,62; 4,55; 4,64 = 4,60 cm

5-7: 4,80; 4,87; 4,84 = 4,84 cm



Se fijan a 5 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
5,0 A	46 V	5,0 A	51 V	1 seg
4,98 A	45 V	4,99 A	47 V	10 min
4,98 A	44 V	4,99 A	46 V	32 min
4,97 A	45 V	4,99 A	46 V	42 min

El caudal medio es 137,67 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	20,8	6,58	4,41	606	10,1	6	1,7	26	0,13	60,5
Salida	23,0	7,19	4,76	588	0,71	3	0,0	9	2,98	20

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$2,32 \times 10^5$	$2,76 \times 10^4$
Salida	$1,7 \times 10^3$	4

## Hierro

Distancia entre electrodos

1-3: 4,70; 4,71; 4,71 = 4,706 cm

5-7: 4,68; 4,77; 4,77 = 4,74 cm

Se fijan a 5 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
5,0 A	43 V	5,0 A	44 V	1 seg
4,98 A	43 V	4,99 A	44 V	1 min
4,98 A	43 V	4,99 A	43 V	2 min
4,97 A	40 V	4,99 A	39 V	15 min
4,97 A	39 V	4,99 A	40 V	45 min
4,97 A	39 V	4,99 A	40 V	60 min

El caudal medio es 143,5 l/h.

El agua que sale del electrocoagulador es de color verdoso, en la superficie se forma una capa de partículas de color amarillo.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	21,5	6,77	4,45	614	10,1	6	1,7	26	60,5
Salida	22,9	7,58	0,10	610	17,5	3	0,1	12	26

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$2,32 \times 10^6$	$2,76 \times 10^4$
Salida	$2,0 \times 10^3$	3

### Experiencia 95. 15 – 06-2010

#### Hierro

El agua de entrada está bastante turbia.

Distancia entre electrodos

1-3: 4,47; 4,60; 4,52; 4,54 = 4,53 cm

5-7: 4,65; 4,77; 4,88 = 4,766 cm

Se fijan a 5 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
5,0 A	43 V	5,0 A	44 V	1 seg
4,99 A	42 V	4,99 A	44 V	1 min
4,98 A	39 V	4,99 A	39 V	7 min
4,98 A	38 V	4,99 A	39 V	50 min

El agua que sale del electrocoagulador es de color verdoso con muy poca espuma en la superficie y se observa una capa metálica de color verde oscuro ligeramente amarillo.

El caudal medio es 144,86 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	20,8	6,73	5,2	625	70,01	10	3,6	69	141
Salida	22,7	7,27	3,76	601	7,66	3	0,0	7	22,5

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$4,02 \times 10^6$	$1,8 \times 10^5$
Salida	283	1

## Aluminio

Distancia promedio entre electrodos:

1-3: 4,43 cm

5-7: 4,65 cm

Distancia entre placas que separan la ubicación de las fuentes F1 y F2.

3-5: 5,14; 5,26; 5,34 = 5,25 cm

Se fijan a 5 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
5,0 A	43 V	5,0 A	47 V	1 seg
4,99 A	43 V	4,99 A	47 V	1 min
4,98 A	42 V	4,99 A	45 V	10 min
4,98 A	43 V	4,99 A	45V	30 min
4,98 A	44 V	4,99 A	45 V	45 min

El caudal promedio es 144 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	21,9	6,92	4,55	639	70,01	10	3,6	69	0,24	141
Salida	23,3	7,55	3,92	618	0,73	3	0,1	8	2,29	19

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$4,02 \times 10^6$	$1,8 \times 10^5$
Salida	$9,9 \times 10^3$	6

16 de Junio a 15 de julio 2010, ensayos utilizando placas de aluminio y hierro en sistemas bipolar, a intensidades de corriente de 1, 3, 5, 7 y 9 amperios. Los parámetros analizados fueron: conductividad, pH, turbidez, oxígeno disuelto, temperatura, sólidos en suspensión, fósforo total, nitrógeno total, dureza total, demanda química de oxígeno, E. Coli y coliformes totales.

### Experiencia 96. 16 – 6 -2010

#### Aluminio

El agua de entrada está bastante sucia.

Se fijan a 5 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
5,0 A	44 V	5,0 A	46 V	1 seg
4,99 A	44 V	4,99 A	45 V	inicio
4,99 A	43 V	4,99 A	45 V	10 min
4,99 A	43 V	4,99 A	44V	30 min
4,98 A	44 V	4,99 A	43 V	45 min

El caudal promedio es 139,17 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	20,7	6,80	5,43	642	20,6	7	2,1	37	010	65
Salida	21,4	7,54	4,25	613	1,15	4	0,0	10	2,95	19,5

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$3,02 \times 10^6$	$2,4 \times 10^5$
Salida	$3,3 \times 10^3$	21

#### Hierro

El agua de entrada está bastante turbia.

Distancia entre electrodos

1-3: 4,47; 4,60; 4,52; 4,54 = 4,53 cm

5-7: 4,65; 4,77; 4,88 = 4,766 cm

Se fijan a 5 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
5,0 A	41 V	5,0 A	43 V	1 seg
4,99 A	41 V	4,99 A	43 V	30 seg
4,99 A	40 V	4,99 A	42 V	1 min
4,98 A	39 V	4,99 A	39 V	10 min
4,98 A	39 V	4,99 A	39 V	30 min

El agua que sale del electrocoagulador es de color verdoso con muy poca espuma en la superficie y se observa una capa metálica de color verde oscuro ligeramente amarillo. Los flóculos se forman rápidamente.

El caudal promedio es 144,22 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	21,1	6,80	5,85	645	17,0	7	2,1	37	65
Salida	22,2	7,37	0,19	628	8,60	5	0,0	13	23

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$3,02 \times 10^6$	$2,4 \times 10^5$
Salida	$1,6 \times 10^3$	2

### Experiencia 97. 17 – 06 – 2010

#### Hierro

El agua de entrada está bastante turbia.

Distancia entre electrodos

1-3: 4,62; 4,70; 4,56; 4,55 = 4,61 cm

5-7: 4,87; 4,85; 4,80; 4,82; 4,82 = 4,83 cm

Se fijan a 3 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
2,98 A	25 V	2,99 A	26 V	inicio
2,98 A	24 V	2,99 A	25 V	8 min
2,98 A	24 V	2,99 A	25 V	10 min
2,98 A	24 V	2,99 A	24 V	17 min
2,98 A	23 V	2,99 A	24 V	32 min
2,98 A	23 V	2,99 A	23 V	40 min

A los 30 minutos de electrocoagulación se observa que el agua que sale del electrocoagulador era de color ligeramente verde, los flocúlos se forman rápidamente y se agrupan para posteriormente precipitar.

El caudal promedio es 144,22 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	20,8	6,85	6,34	652	17,9	5	1,9	42	82,5
Salida	21,0	7,42	0,85	618	40,2	1	0,1	19	24

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	1,66 x 10 <sup>5</sup>	2,6 x 10 <sup>5</sup>
Salida	Incontables	7,2 x 10 <sup>3</sup>

### Aluminio

El agua de entrada está bastante sucia.

Se fijan a 3 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
3,0 A	32 V	3,0 A	32 V	1 seg
2,98 A	27 V	2,99 A	29 V	inicio
2,98 A	26 V	2,99 A	27 V	10 min
2,98 A	25 V	2,99 A	27V	30 min
2,98 A	26 V	2,99 A	27 V	50 min

El caudal medio es 139,17 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	22,1	6,92	6,37	662	17,9	5	1,9	42	0,09	82,5
Salida	22,0	7,88	4,29	628	1,41	3	0,0	11	2,08	22,5

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$3,02 \times 10^6$	$2,4 \times 10^5$
Salida	$9,2 \times 10^3$	$8 \times 10^2$

**Dureza total:**

Entrada = 117 mg/l CaCO<sub>3</sub>

Salida Al = 101,5 mg/l CaCO<sub>3</sub>

Salida Fe = 112 mg/l CaCO<sub>3</sub>

**Experiencia 98. 21 – 6 – 2010**

**Aluminio**

El agua de entrada está bastante turbia.

Distancia entre electrodos

1-3: 4,74; 4,74; 4,76; 4,83 = 4,77 cm

3-5: 5,35; 5,05; 5,0; 5,0 = 5,1 cm

5-7: 4,84; 4,89; 4,89; 4,84 = 4,86 cm

Se fijan a 3 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
2,99 A	25 V	2,99 A	26 V	1 seg
2,99 A	24 V	2,99 A	25 V	inicio
2,98 A	24 V	2,99 A	25 V	10 min
2,98 A	24 V	2,98 A	25V	30 min
2,98 A	24 V	2,98 A	25 V	50 min

El caudal medio es 135,00 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	22,0	6,99	6,22	688	20,8	10	1,8	43	0,15	83
Salida	22,4	7,78	4,06	683	1,58	6	0,0	8	1,6	7,5

**Dureza total:**

Entrada = 117 mg/l CaCO<sub>3</sub>

Salida Al = 101,5 mg/l CaCO<sub>3</sub>

Salida Fe = 112 mg/l CaCO<sub>3</sub>

**Hierro**

El agua de entrada está bastante turbia con lodo.

Se fijan a 3 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
2,98 A	23 V	2,99 A	23 V	inicio
2,98 A	22 V	2,99 A	23 V	10 min
2,98 A	22 V	2,98 A	22 V	20 min
2,98 A	21 V	2,98 A	22 V	45 min

A los 30 minutos de electrocoagulación, se observa que el agua que sale del electrocoagulador era de color amarillo verdoso, tardó en precipitar, la turbidez a las 24 horas era aún muy alta 20,1 NTU.

El caudal promedio es 142,27 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	22,8	7,16	3,42	708	66,9	21	3,6	109	134
Salida	22,9	8,30	0,55	682	44,3	5	0,1	22	33,5



**Experiencia 99. 22 – 06 – 2010****Hierro**

El agua de entrada está bastante turbia.

Distancia entre electrodos

1-3: 4,71; 4,66; 4,65 = 4,67 cm

3-5: 4,90; 4,98; 5,00 = 4,96

5-7: 4,74; 4,74; 4,72 = 4,73 cm

Se fijan a 3 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
2,99 A	24 V	2,99 A	24 V	inicio
2,98 A	22 V	2,99 A	23 V	10 min
2,98 A	21 V	2,98 A	22 V	30 min

El caudal medio es 144,22 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	22,5	7,50	7,63	711	17,4	11,5	1,7	41	62
Salida	22,7	7,94	0,81	692	45,7	7	0,0	20	8

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$2,17 \times 10^5$	$7,3 \times 10^5$
Salida	Incontables	Incontables

**Aluminio**

El agua de entrada está bastante turbia.

Se fijan a 3 A las fuentes de alimentación, pero al encender comienzan a variar como sigue:

F1		F2		Tiempo
2,98 A	27 V	2,99 A	29 V	1 seg
2,98 A	23 V	2,99 A	24 V	inicio
2,98 A	22 V	2,98 A	24 V	10 min
2,98 A	23 V	2,98 A	24 V	30 min
2,98 A	22 V	2,98 A	24 V	50 min

El caudal medio es 135,00 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduc t. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	23,7	7,49	6,97	724	17,4	11,5	1,7	41	0,15	62
Salida	24,1	8,25	4,09	721	2,40	7	0,0	12	1,6	8

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$2,17 \times 10^6$	$7,3 \times 10^5$
Salida	$7,25 \times 10^3$	$5,3 \times 10^3$

#### Experiencia 100. 23 – 06 – 2010

Incidencia, entra fango por la manguera, no se realiza la experimentación. Se coloca una alcachofa en la succión para evitar la entrada de fango y descebado de la tubería.

#### Experiencia 101. 24 – 06 – 2010

Se comienza llenando el depósito de alimentación. Se fijan las intensidades de corriente en las fuentes de alimentación.

#### Aluminio

F1		F2		Tiempo
6,98 A	45 V	7,00 A	47 V	inicio
6,98 A	45 V	6,99 A	46 V	10 min
6,98 A	45 V	6,99 A	46 V	20 min
6,98 A	45 V	6,99 A	46 V	30 min
6,98 A	46 V	6,99 A	45 V	40 min
6,98 A	46 V	6,99 A	45 V	50 min

El caudal medio es 135,00 l/h

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduc t. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	Al (mg/l)	DQO mg/l
Entrada	23,7	7,44	7,23	840	17,6	29,5	2,0	39	0,15	83,5
Salida	26,4	8,25	3,32	836	1,74	24	0,0	9	2,4	21,5

### Hierro

F1	F2	Tiempo
6,99 A	39 V	inicio
6,99 A	39 V	10 min
6,98 A	40 V	20 min
6,98 A	40 V	30 min
6,98 A	41 V	40 min
6,98 A	41 V	50 min

El agua que sale del electrocoagulador es de color verde oscuro, se observa una ligera capa de espuma, en la superficie tiene un brillo metálico. En el decantador el agua es de color verde oscuro con muchos flóculos, que decantan rápidamente. Pero hay partículas que quedan en el sobrenadante y en la pared del cono.

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	24,7	7,43	6,25	866	17,6	29,5	2,0	39	83,5
Salida	26,9	8,51	0,2	888	7,0	23	0,0	10	27

### Experiencia 102. 25 -06-2010

El agua estaba bastante sucia.

**Hierro**

F1		F2		Tiempo
0,98 A	6 V	0,98 A	7 V	inicio
0,98 A	7 V	0,98 A	7 V	10 min
0,98 A	7 V	0,98 A	7 V	20 min
0,98 A	7 V	0,98 A	7 V	30 min
0,98 A	7 V	0,98 A	7 V	40 min
0,98 A	7 V	0,98 A	7 V	50 min

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l
Entrada	23,8	7,40	6,55	874	17,0	34	2,3	35	88
Salida	23,9	8,00	4,61	867	60	31	1,3	43	55,5

**Aluminio**

Distancia entre electrodos:

1-3: 4,66; 4,55; 4,62; 4,58

5-7: 4,76; 4,78

F1		F2		Tiempo
0,98 A	8 V	0,98 A	8 V	inicio
0,98 A	8 V	0,98 A	8 V	10 min
0,98 A	8 V	0,98 A	8 V	20 min
0,98 A	8 V	0,98 A	8 V	30 min
0,98 A	8 V	0,98 A	8 V	40 min
0,98 A	8 V	0,98 A	8 V	50 min

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l	Al mg/l
Entrada	23,9	7,33	6,60	861	17,0	34	2,3	35	88	0,09
Salida	23,8	7,68	5,20	856	15,6	29	0,0	40	38,5	2,4 <sup>+</sup>

**Dureza total:**

Entrada = 111,1 mg/l CaCO<sub>3</sub>

Salida Al = 106 mg/l CaCO<sub>3</sub>

Salida Fe = 107 mg/l CaCO<sub>3</sub>

**Dureza Cálctica:**

Entrada = 36,8 mg/l Ca<sup>2+</sup>

Salida Al = 30 mg/l Ca<sup>2+</sup>

Salida Fe = 34,4 mg/l Ca<sup>2+</sup>

**Experiencia 103. 28 – junio – 2010****Aluminio (7 A)**

Distancia entre electrodos:

1-3: 4,74; 4,76; 4,86

5-7: 4,68; 4,70; 4,83

F1		F2		Tiempo
6,98 A	54 V	6,99 A	54 V	inicio
6,98 A	54 V	6,99 A	54 V	10 min
6,98 A	54 V	6,99 A	54 V	20 min
6,98 A	54 V	6,99 A	53 V	30 min
6,98 A	54 V	6,99 A	53 V	40 min
6,98 A	54 V	6,99 A	53 V	50 min

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l	Al mg/l
Entrada	23,9	7,10	6,85	719	7,0	11	0,7	22	52,5	
Salida	27,4	8,23	3,46	706	0,62	9	0,1	12	20	

**Hierro(7 A)**

Distancia entre electrodos:

1-3: 4,64; 4,64; 4,72

5-7: 4,87; 4,78; 4,70

F1		F2		Tiempo
6,98 A	47 V	6,99 A	45 V	inicio
6,98 A	48 V	6,99 A	47 V	10 min
6,98 A	48 V	6,99 A	48 V	20 min
6,98 A	48 V	6,99 A	48 V	30 min
6,98 A	47 V	6,99 A	49 V	40 min
6,98 A	47 V	6,99 A	48 V	50 min

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l	Al mg/l
Entrada	24,7	7,16	6,72	723	7,0	11	0,7	22	52,5	
Salida	27,6	8,68	0,02	709	4,50	9	0,0	17	15,5	

**Dureza total:**

Entrada = 120 mg/l CaCO<sub>3</sub>

Salida Al = 99 mg/l CaCO<sub>3</sub>

Salida Fe = 99 mg/l CaCO<sub>3</sub>

**Dureza Cálcica:**

Entrada = 38 mg/l Ca<sup>2+</sup>

Salida Al = 26,8 mg/l Ca<sup>2+</sup>

Salida Fe = 30 mg/l Ca<sup>2+</sup>

**Microbiológico:**

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	1,98 x 10 <sup>6</sup>	3,5 x 10 <sup>5</sup>
Salida Al	3,85 x 10 <sup>3</sup>	33
Salida Fe	50	10

**Experiencia 104. 29-JUNIO-2010****Hierro(9 A)**

Distancia entre electrodos:

1-3: 4,67; 4,60; 4,68

5-7: 4,76; 4,89; 4,76

F1		F2		Tiempo
9,00 A	55 V	9,00 A	54 V	inicio
8,99 A	55 V	9,00 A	55 V	10 min
8,99 A	55 V	8,99 A	56 V	20 min
8,99 A	55 V	8,99 A	56 V	30 min
8,99 A	55 V	8,99 A	57 V	40 min
8,99 A	55 V	8,99 A	57 V	50 min

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l	Al mg/l
Entrada	24,3	7,35	5,76	803	7,95	19	1,0	31	63,5	
Salida	28,7	8,88	0,00	803	4,44	18	0,0	10	14	

### Aluminio( 9 A)

Distancia entre electrodos:

1-3: 4,74; 4,74; 4,69

5-7: 5,40; 5,12; 4,98

F1		F2		Tiempo
9,00 A	58 V	8,99 A	60 V	inicio
8,99 A	58 V	8,99 A	59 V	10 min
8,99 A	58 V	8,99 A	60 V	20 min
8,99 A	58 V	8,99 A	59 V	30 min
8,99 A	58 V	8,99 A	58 V	40 min
8,99 A	57 V	8,99 A	58 V	50 min

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l	Al mg/l
Entrada	25,1	7,37	5,91	811	7,95	19	1,0	31	63,5	
Salida	30,0	8,78	3,49	805	1,14	15	0,0	11	19	

**Dureza total:**Entrada = 112 mg/l CaCO<sub>3</sub>Salida Al = 87 mg/l CaCO<sub>3</sub>Salida Fe = 93 mg/l CaCO<sub>3</sub>**Dureza Cálctica:**Entrada = 37,4 mg/l Ca<sup>2+</sup>Salida Al = 23,6 mg/l Ca<sup>2+</sup>Salida Fe = 32 mg/l Ca<sup>2+</sup>**Microbiológico:**

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	2,81 x 10 <sup>5</sup>	5,5 x 10 <sup>5</sup>
Salida Al	166	11
Salida Fe	116	6

**Experiencia 105. 30-JUNIO-2010****Aluminio(9 A)**

Distancia entre electrodos:

1-3: 4,75; 4,77; 4,78

5-7: 4,79; 4,78; 4,73

F1		F2		Tiempo
8,99 A	61 V	8,99 A	62 V	inicio
8,98 A	61 V	8,99 A	61 V	10 min
8,98 A	61 V	8,99 A	61 V	20 min
8,98 A	62 V	8,99 A	60 V	30 min
8,98 A	62 V	8,99 A	60 V	40 min
8,98 A	63 V	8,99 A	59 V	50 min



Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l	Al mg/l
Entrada	24,8	7,24	6,21	784	8,5	21,5	1,05	31	75,5	
Salida	29,8	8,53	3,26	782	0,85	17	0,0	11	18	

**Hierro(9 A)**

Distancia entre electrodos:

1-3: 4,72; 4,73; 4,71

5-7: 4,8; 4,72; 4,84

F1		F2		Tiempo
9,00 A	56 V	8,99 A	53 V	inicio
9,00 A	56 V	8,99 A	54 V	10 min
8,99 A	56 V	8,99 A	55 V	20 min
8,99 A	56 V	8,99 A	55 V	30 min
8,99 A	57 V	8,99 A	56 V	40 min
8,99 A	56 V	8,99 A	55 V	50 min

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l	Al mg/l
Entrada	25,7	7,31	6,05	787	8,5	21,5	1,05	31	75,5	
Salida	29,9	9,26	0,05	790	6,58	16	0,0	12	20	

**Dureza total:**

Entrada = 118 mg/l CaCO<sub>3</sub>

Salida Al = 79,5 mg/l CaCO<sub>3</sub>

Salida Fe = 95,5 mg/l CaCO<sub>3</sub>

**Dureza Cálctica:**

Entrada = 35,8 mg/l Ca<sup>2+</sup>

Salida Al = 26,6 mg/l Ca<sup>2+</sup>

Salida Fe = 29,2 mg/l Ca<sup>2+</sup>

**Microbiológico:**

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$1,95 \times 10^6$	$6,3 \times 10^5$
Salida Al	$4,2 \times 10^3$	44
Salida Fe	54	3

**Experiencia 105. 1 JULIO – 2010****Aluminio 9.A). SIN PLACA INTERMEDIA**

Distancia entre electrodos:

1-2: 4,64; 4,65; 4,64

3-4: 4,60; 4,66; 4,64

F1		F2		Tiempo
8,99 A	61 V	8,99 A	60 V	inicio
8,98 A	61 V	8,99 A	60 V	10 min
8,98 A	60 V	8,99 A	59 V	20 min
8,98 A	59 V	8,99 A	59 V	30 min
8,98 A	59 V	8,99 A	59 V	40 min
8,98 A	59 V	8,99 A	59 V	50 min

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l	Al mg/l
Entrada	25,3	7,12	6,02	788	7,6	20	1,3	36	69,5	
Salida	29,5	7,98	3,85	823	1,77	19	0,0	1	24,5	

**Hierro (9 A). SIN PLACA INTERMEDIA**

Distancia entre electrodos:

1-2: 4,55; 4,48; 4,48

3-4: 4,56; 4,55; 4,55

F1		F2		Tiempo
8,99 A	55 V	8,99 A	53 V	inicio
8,98 A	55 V	8,99 A	52 V	10 min
8,98 A	55 V	8,99 A	52 V	20 min
8,98 A	55 V	8,99 A	52 V	30 min
8,98 A	55 V	8,99 A	52 V	40 min
8,98 A	55 V	8,99 A	52 V	50 min

Agua	T °C	pH	OD (mg/l)	Conduct. S/cm	Turb. NTU	N-total (mg/l)	P-Total (mg/l)	SS mg/l	DQO mg/l	Al mg/l
Entrada	26,1	7,16	6,14	797	7,6	20	1,3	36	69,5	
Salida	29,8	7,95	0,08	831	22,6	15	0,1	23	22,5	

**Dureza total:**

Entrada = 106 mg/l CaCO<sub>3</sub>

Salida Al = 92 mg/l CaCO<sub>3</sub>

Salida Fe = 96 mg/l CaCO<sub>3</sub>

**Dureza Cálctica:**

Entrada = 34,4 mg/l Ca<sup>2+</sup>

Salida Al = 28,8 mg/l Ca<sup>2+</sup>

Salida Fe = 30,4 mg/l Ca<sup>2+</sup>

**Microbiológico:**

Agua	Coliformes totales (Nº colonias/100 ml)	E. coli (Nº colonias/100 ml)
Entrada	$2,67 \times 10^6$	$9,4 \times 10^5$
Salida Al	$2,08 \times 10^4$	$6,5 \times 10^3$
Salida Fe	$7,3 \times 10^3$	59

16 de Julio a 15 de agosto 2010, ensayos con placas de aluminio y hierro en sistemas monopolar, trabajando a la mismas intensidades de corriente de 1, 3, 5, 7 y 9 A. Los parámetros analizados fueron: conductividad, pH, turbidez, oxígeno disuelto, temperatura, sólidos en suspensión, fósforo total, nitrógeno total, dureza total, demanda química de oxígeno, E. Coli y coliformes totales.

16 de agosto a 15 de septiembre 2010, ensayos con placas de aluminio y hierro utilizando como cátodo electrodos de grafito, a las mismas intensidades de corriente de 1, 3, 5, 7 y 9 A. Los parámetros analizados fueron: conductividad, pH, turbidez, oxígeno disuelto, temperatura, sólidos en suspensión, fósforo total, nitrógeno total, dureza total, demanda química de oxígeno, E. Coli y coliformes totales.

16 – 30 de septiembre de 2010, ensayos con placas de aluminio y hierro, variando la conductividad del agua, por medio de la utilización de un electrolito como es NaCl, a diferentes concentraciones.

Octubre 2010, Análisis de los resultados obtenidos.

Noviembre – diciembre 2010, evaluación, discusión y conclusiones de los resultados.

Enero 2011, redacción de la tesis.

**ANEJO 3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y PLANOS DE  
LA PLANTA**



**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARTICULARES DE LOS  
EQUIPOS MECÁNICOS DE LA PLANTA**





# INDICE



# INDICE

CÓDIGO	EQUIPO
• EM01	BOMBA PISTON
• EM02:	BOMBA PISTON
• EM03:	BOMBA PISTON
• EM04:	BOMBA PISTON
• EM05:	BOMBA PISTON
• EM06:	BOMBA PISTON
• EM07:	BOMBA MEMBRANA
• EM08:	AGITADOR VERTICAL
• EM09:	AGITADOR VERTICAL
• EM10:	SOPLANTE CANAL LATERAL
• EM11:	FUENTE DE ENERGÍA
• EM12:	MANÓMETRO
• EM13:	CAUDALÍMETRO DN 15
• EM14:	CAUDALÍMETRO DN 25
• EM15:	CONTROLADOR
• EM16:	MEDIDOR DE PH
• EM17:	MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD
• EM18:	MEDIDOR DE O2



<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 01
<b>EQUIPO:</b> BOMBA DOSIFICADORA DE PISTON	
<b>SERVICIO:</b> DOSIFICACIÓN ACIDO SULFÚRICO	Hoja 1 de 1

**CARACTERÍSTICAS:**

- Marca: OBL / TFB o similar.
- Tipo: RCAN-6 AC 25 DV
- Dosificador: pistón
- Tipo regulación: con variador de frecuencia de 0 a 100 %.
- Caudal al 10 %: 0,023 litros/hora.
- Caudal al 100 %: 0,230 litros/hora.
- Cadencia del `piston: 16 g.p.m
- Presión de impulsión: 10 kg/cm2.
- Caja de válvulas: doble bola en PVC
- Diámetro del piston: 6 mm.
- Material de la empaquetadura: PTFE
- Conexiones aspiracion/impulsión: DN 1/4" R.Gas H.

**DATOS DEL MOTOR:**

- Marca: LAFER con salida especial.
- Potencia instalada: 0,37 kW.
- Velocidad: 1.500 rpm.

Tensión alimentación: 230 / 400 V. Frecuencia: 50 Hz.

- Protección: IP-55.
- Aislamiento: Clase F.

**MATERIALES:**

- Bolas: PVC
- Caja de válvulas: doble bola en PVC.
- Material del cabezal: AISI 316 L.
- Material del piston: Cerámica

<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 02
<b>EQUIPO:</b> BOMBA DOSIFICADORA DE PISTON	
<b>SERVICIO:</b> DOSIFICACIÓN AGENTE CONDUCTOR	Hoja 1 de 1

**CARACTERÍSTICAS:**

- Marca: OBL / TFB o similar.
- Tipo: RCAN-6 AC 25 DV
- Dosificador: pistón
- Tipo regulación: con variador de frecuencia de 0 a 100 %.
- Caudal al 10 %: 0,023 litros/hora.
- Caudal al 100 %: 0,230 litros/hora.
- Presión de impulsión: 10 kg/cm<sup>2</sup>.
- Cadencia del `piston: 16 g.p.m
- Diámetro del piston: 6 mm.
- Material de la empaquetadura: PTFE
- Conexiones aspiracion/impulsión: DN 1/4" R.Gas H.

**DATOS DEL MOTOR:**

- Marca: LAFER con salida especial.
- Potencia instalada: 0,37 kW.
- Velocidad: 1.500 rpm.
- Tensión alimentación: 230 / 400 V. Frecuencia: 50 Hz.
- Protección: IP-55.
- Aislamiento: Clase F.

**MATERIALES:**

- Bolas: PVC
- Caja de válvulas: doble bola en PVC.
- Material del cabezal: AISI 316 L.
- Material del piston: Cerámica

<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 03
<b>EQUIPO:</b> BOMBA DOSIFICADORA DE PISTON	
<b>SERVICIO:</b> DOSIFICACIÓN POLIELECTROLITO/	Hoja 1 de 1

**CARACTERÍSTICAS:**

- Marca: OBL / TFB o similar.
- Tipo: RBB-10 AC 25 DV
- Dosificador: pistón
- Tipo regulación: con variador de frecuencia de 0 a 100 %.
- Caudal al 10 %: 0,02 litros/hora.
- Caudal al 100 %: 0,2 litros/hora.
- Cadencia del `piston: 36 g.p.m
- Presión de impulsión: 10 kg/cm2.
- Caja de válvulas: doble bola en PVC
- Diámetro del piston: 6 mm.
- Material de la empaquetadura: PTFE
- Conexiones aspiracion/impulsión: DN 1/4" R.Gas H.

**DATOS DEL MOTOR:**

- Marca: LAFER con salida especial.
- Potencia instalada: 0,20 kW.
- Velocidad: 1.500 rpm.
- Tensión alimentación: 230 / 400 V. Frecuencia: 50 Hz.
- Protección: IP-55.
- Aislamiento: Clase F.

**MATERIALES:**

- Bolas: PVC
- Caja de válvulas: doble bola en AISI 316.
- Material del cabezal: AISI 316 L.
- Material del piston: Cerámica

<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 04
<b>EQUIPO:</b> BOMBA DOSIFICADORA DE PISTON	
<b>SERVICIO:</b> DOSIFICACIÓN SOSA/	Hoja 1 de 1

**CARACTERÍSTICAS:**

- Marca: OBL / TFB o similar.
- Tipo: RBB-10 AC 25 DV
- Dosificador: pistón
- Tipo regulación: con variador de frecuencia de 0 a 100 %.
- Caudal al 10 %: 0,02 litros/hora.
- Caudal al 100 %: 0,2 litros/hora.
- Cadencia del `piston: 36 g.p.m
- Presión de impulsión: 10 kg/cm2.
- Caja de válvulas: doble bola en PVC
- Diámetro del piston: 6 mm.
- Material de la empaquetadura: PTFE
- Conexiones aspiracion/impulsión: DN 1/4" R.Gas H.

**DATOS DEL MOTOR:**

- Marca: LAFER con salida especial.
- Potencia instalada: 0,20 kW.
- Velocidad: 1.500 rpm.
- Tensión alimentación: 230 / 400 V. Frecuencia: 50 Hz.
- Protección: IP-55.
- Aislamiento: Clase F.

**MATERIALES:**

- Bolas: PVC
- Caja de válvulas: doble bola en AISI 316.
- Material del cabezal: AISI 316 L.
- Material del piston: Cerámica



<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 05
<b>EQUIPO:</b> BOMBA DOSIFICADORA DE PISTON	
<b>SERVICIO:</b> DOSIFICACIÓN BICARBONATO/	Hoja 1 de 1

**CARACTERÍSTICAS:**

- Marca: OBL / TFB o similar.
- Tipo: RBB-10 AC 25 DV
- Dosificador: pistón
- Tipo regulación: con variador de frecuencia de 0 a 100 %.
- Caudal al 10 %: 0,02 litros/hora.
- Caudal al 100 %: 0,2 litros/hora.
- Cadencia del `piston: 36 g.p.m
- Presión de impulsión: 10 kg/cm2.
- Caja de válvulas: doble bola en PVC
- Diámetro del piston: 6 mm.
- Material de la empaquetadura: PTFE
- Conexiones aspiracion/impulsión: DN 1/4" R.Gas H.

**DATOS DEL MOTOR:**

- Marca: LAFER con salida especial.
- Potencia instalada: 0,20 kW.
- Velocidad: 1.500 rpm.
- Tensión alimentación: 230 / 400 V. Frecuencia: 50 Hz.
- Protección: IP-55.
- Aislamiento: Clase F.

**MATERIALES:**

- Bolas: PVC
- Caja de válvulas: doble bola en AISI 316.
- Material del cabezal: AISI 316 L.
- Material del piston: Cerámica

<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 06
<b>EQUIPO:</b> BOMBA DOSIFICADORA DE PISTON	
<b>SERVICIO:</b> DOSIFICACIÓN CARBONATO/	Hoja 1 de 1

**CARACTERÍSTICAS:**

- Marca: OBL / TFB o similar.
- Tipo: RBB-10 AC 25 DV
- Dosificador: pistón
- Tipo regulación: con variador de frecuencia de 0 a 100 %.
- Caudal al 10 %: 0,02 litros/hora.
- Caudal al 100 %: 0,2 litros/hora.
- Cadencia del `piston: 36 g.p.m
- Presión de impulsión: 10 kg/cm2.
- Caja de válvulas: doble bola en PVC
- Diámetro del piston: 6 mm.
- Material de la empaquetadura: PTFE
- Conexiones aspiracion/impulsión: DN 1/4" R.Gas H.

**DATOS DEL MOTOR:**

- Marca: LAFER con salida especial.
- Potencia instalada: 0,20 kW.
- Velocidad: 1.500 rpm.
- Tensión alimentación: 230 / 400 V. Frecuencia: 50 Hz.
- Protección: IP-55.
- Aislamiento: Clase F.

**MATERIALES:**

- Bolas: PVC
- Caja de válvulas: doble bola en AISI 316.
- Material del cabezal: AISI 316 L.
- Material del piston: Cerámica

<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 07
<b>EQUIPO:</b> BOMBA DOSIFICADORA DE MEMBRANA	
<b>SERVICIO:</b> AGUA DE TRATAMIENTO	Hoja 1 de 2

**CARACTERÍSTICAS:**

- Marca: OBL / TFB o similar.
- Tipo: MB-120 PP
- Dosificador: membrana mecánica
- Tipo regulación: con variador de frecuencia de 0 a 100 %.
- Caudal al 10 %: 12 litros/hora.
- Caudal al 100 %: 120 litros/hora.
- Cadencia del `piston: 115 g.p.m
- Presión de impulsión: 6 bar.
- Caja de válvulas: simple bola PP
- Diámetro de la membrana: 108 mm
- Material de la membrana: TEFLON
- Conexiones aspiracion/impulsión: DN 3/8" R.Gas H.

**DATOS DEL MOTOR:**

- Marca: GAMAR con salida especial.
- Potencia instalada: 0,20 kW.
- Velocidad: 1.500 rpm.
- Tensión alimentación: 230 / 400 V. Frecuencia: 50 Hz.
- Protección: IP-55.
- Aislamiento: Clase F.

**MATERIALES:**

- Caja de válvulas: simple bola PP
- Material de asientos/bolas: simple bola en PP..
- Material de la membrana: TEFLON.
- Material del cabezal: PP

---

<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 07
<b>EQUIPO:</b> BOMBA DOSIFICADORA DE MEMBRANA	
<b>SERVICIO:</b> AGUA DE TRATAMIENTO	Hoja 2 de 2

**MATERIALES:**

- Tipo: U003 A01 N1 PP
- Material del cuerpo: polipropileno.
- Material vejiga: NBR.
- Conexión de proceso:  $\varnothing$  3/4" R. GAS H.
- Volumen: 0,25 l
- Presión de tarado: 1,5 bar.

<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 08
<b>EQUIPO:</b> AGITADOR VERTICAL	
<b>SERVICIO:</b> TANQUE DE PRETRATAMIENTO/	Hoja 1 de 1

**CARACTERÍSTICAS DEL AGITADOR:**

- Marca: TFB Flygt o similar.
- Modelo: NAL-0,25- 1000 BR
- Tipo de hélice: Marina
- Diámetro hélice: 100 mm.
- Longitud del eje: 700 mm.
- Transmisión: Motorreductor Leroy Somer.
- Amarre agitador: diámetro : 150 mm
- Material de la hélice y del eje: acero inoxidable AISI 304 revestido con polietileno



**CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR:**

- Velocidad de salida: 100 Orpm.
- Potencia motor: 0,25 kW.
- Tensión: III 400 V - 50 Hz.
- Protección / aislamiento: IP 55 / clase F.

<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 09
<b>EQUIPO:</b> AGITADOR VERTICAL	
<b>SERVICIO:</b> AGITACIÓN REACTIVOS/	Hoja 1 de 1

**CARACTERÍSTICAS DEL AGITADOR:**

- Marca: I.C.T,SL
- Modelo: agitador de varilla 686/1
- Dimensiones (mm): 160 x160 x 370
- Incluye soporte.
- Número de varillas agitadoras: 2 ud
- Tipo de agitador: paleta.

**CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR:**

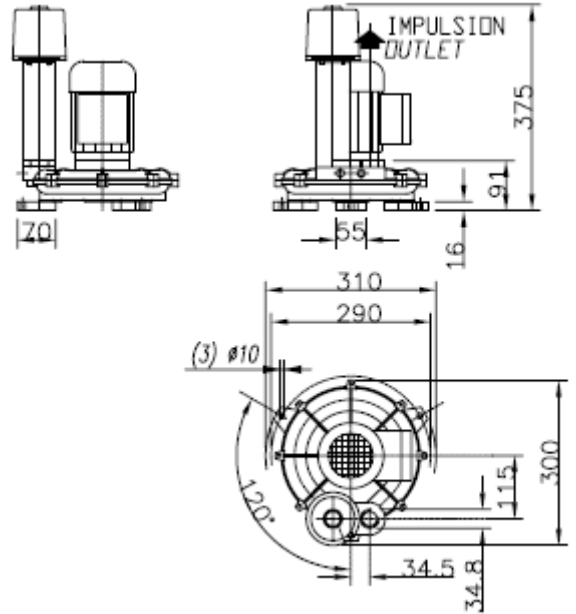
- Velocidad de salida: 100-1000 rpm
- Potencia motor: 0,10 kW.
- Tensión: 220 V –
- Frecuencia: 50 Hz.



<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 10
<b>EQUIPO:</b> SOPLANTE DE CANAL LATERAL	
<b>SERVICIO:</b> AIREACIÓN	Hoja 1 de 1

**CARACTERÍSTICAS:**

- Marca: MPR o similar.
- Tipo: canal laterañ.
- Modelo: CL3,6/01 S
- Caudal aspiración: 25-6 m3/h.
- Presión diferencial: 50-150 mbar
- Filtro de aspiración : F4
- Válvula de seguridad : SV4T
- Silencioso en aspiración.



**DATOS DE SERVICIO:**

- Temperatura aspiración: 20 °C.
- Temperatura de impulsión: 29-51 °C
- Velocidad del soplante y motor: 2.900 rpm.
- Potencia absorbida al eje: 0,25 kW.
- Tolerancias:
- Para caudal de aspiración: +/- 5%.
- Para potencia absorbida: +/- 5%.
- Nivel de ruido:
- Presión sonora: 72 dB (A).

<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 11
<b>EQUIPO:</b> FUENTE DE ALIMENTACIÓN	
<b>SERVICIO:</b> SUMINISTRO DE ENERGÍA	Hoja 1 de 1

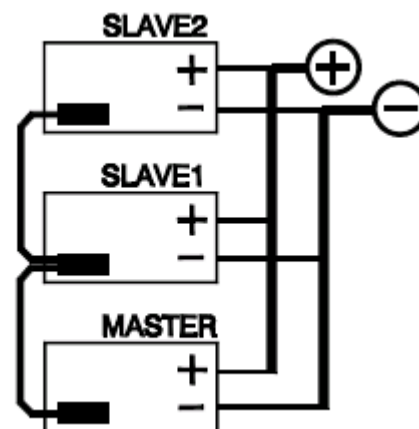
**CARACTERÍSTICAS:**

- Marca: DELTA ELEKTRONIKA BV
- Potencia: 3.000 Watios
- Modelo: SM 3000- series
- Voltaje: 0-300 V
- Intensidad: 0-10 A
- Eficiencia: 91 %
- Voltaje: 380 V, 400 V, 415 V AC
- Factor de potencia: 0,88.
- Regulación:
- Carga del 100%: 15 mV
- Protección térmica: en caso de indufiente refrigeración.
- Potenciómetros: estándar 0,03 %.
- Dimensiones: 128,5 x443x416 mm
- Peso: 15 kg
- 



**FUNCIONAMIENTO**

- -Se pueden realizar ajuste de la potenci, mediante los potenciómetros situado en la pantalla frontal.
- Funcionamiento: ESCLAVO/MAESTO: funionamiento en serie y paralelo.
- El voltaje y la intensidad de las unidades se controlará desde el equipo maestro.





<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 12
<b>EQUIPO:</b> MANÓMETRO	
<b>SERVICIO:</b> MEDIDA DE PRESIÓN	Hoja 1 de 1

**CARACTERÍSTICAS:**

- Marca: BOURDON SEDEME o similar.
- Tipo: muelle tubular.
- Modelo: concéntrico.
- Diámetro de conexión: ½" rosca gas.
- Diámetro nominal: 100 mm.
- Mecanismo de aleación de Cu o de acero CrNi.
- Rangos: 0...0.6 bar a 0...1000 bar, según DIN 16128.
- Protección: en baño de glicerina IP 45, según DIN 40050.
- Clase de precisión 1.6 DIN 16005
- Temperatura máxima de trabajo: 100 °C.
- Presión estática indicada para ambos lados.
- Presión diferencial dada en un dial indicador.
- Escala dual bar/mWS.
- Cuerpo: acero inoxidable AISI 316.
- Ventana: Vidrio de seguridad laminado.
- Dial: Aluminio.
- Protección: IP 33 a DIN 40 050
- Peso aproximado: Entre 1 y 1.6 kg.
- Máxima presión: 1.3 veces valor a fondo de escala a corto plazo.
- Opcionales: Bridas posterior y frontal.

<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 13
<b>EQUIPO:</b> CAUDALÍMETRO ELECTROMAGNÉTICO DN 15	
<b>SERVICIO:</b> MEDIDA DE CAUDAL/	Hoja 1 de 2

**CARACTERÍSTICAS:**

- Marca: SIEMENS o similar.
- Modelo: MAG 5000/1100 WATER.
- Diámetro DN 15

**Convertidor de señal MAG 5000:**

- Tubo electromagnético para la medida de caudal de líquidos.
- Conductores por el procedimiento magnético-inductivo
- Modelo: Sitrans FM, tipo Magflo MAG 1100,
- Ejecución tipo sandwich para montaje entre bridas (no incluidas en el suministro), para conectar a un amplificador de medida de los tipos MAG 5000, 6000 y 6000 I, provisto de sistema inteligente de identificación
- Sensorprom, con:
- Material de la carcasa: Acero inoxidable AISI 316L.
- Material de las juntas: EPDM.
- Conexión al proceso: Tipo Wafer, para montaje entre bridas no
- incluidas en el suministro.
- Tamaño: DN 15 (1/2").
- Material del revestimiento interior del tubo: PFA.
- Temperatura máxima del fluido: -30 a +130 °C.
- Presión máxima de servicio: 20 bar.
- Material de los electrodos de medida: Hastelloy C-276, (sólo Suministrable con el revestimiento de PFA).
- Entrada de cables: Pasacables con rosca M20.
- Caja de bornas: En poliamida

<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 13
<b>EQUIPO:</b> CAUDALÍMETRO ELECTROMAGNÉTICO DN 15	
<b>SERVICIO:</b> MEDIDA DE CAUDAL/	Hoja 2 de 2

**CONVERTIDOR**

- Modelo Sitrans FM, tipo Magflo MAG 5000, con Autodiagnóstico, para conectar a los tubos de medida con Campo magnético de corriente continua chopeada, modelos
- MAG 1100, MAG 1100 F, MAG 3100, MAG 3100 W y MAG 5100 W, con: Formato: Precisión de medida: Mejor del 0,5 % del caudal.
- Ajuste del cero: Automático.
- Identificación de tubo vacío: Incluida, automática.
- Salida analógica: 1 de 0/4 a 20 mA.
- Salida digital: 1 de frecuencia de 0 a 10 kHz.
- Salida de pulsos: 1 activa y 1 pasiva para conectar a totalizadores externos o entradas de PLC.
- Salida de relé: 1 de contacto conmutado para señalización de valor límite o estados de funcionamiento.
- Entrada digital: 1, por ejemplo para arranque o puesta a cero de los totalizadores internos.
- Indicador local: Incluido, retroiluminado, alfanumérico, con 3 líneas de 20 caracteres en 11 idiomas seleccionables.
- Totalizadores: Incluidos 2, con 8 dígitos para flujo, reflujo y neto.
- Protección ambiental: IP 67.
- Material de la carcasa: Poliamida reforzada con fibra de vidrio.
- Alimentación eléctrica: 115 - 230 V.c.a, 50/60 Hz.



<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 14
<b>EQUIPO:</b> CAUDALÍMETRO ELECTROMAGNÉTICO DN 25	
<b>SERVICIO:</b> MEDIDA DE CAUDAL/	Hoja 1 de 2

**CARACTERÍSTICAS:**

- Marca: SIEMENS o similar.
- Modelo: MAG 5000/1100 WATER.
- Diámetro DN 25

**Convertidor de señal MAG 5000:**

- Tubo electromagnético para la medida de caudal de líquidos.
- Conductores por el procedimiento magnético-inductivo
- Modelo: Sitrans FM, tipo Magflo MAG 1100,
- Ejecución tipo sandwich para montaje entre bridas (no incluidas en el suministro), para conectar a un amplificador de medida de los tipos MAG 5000, 6000 y 6000 I, provisto de sistema inteligente de identificación
- Sensorprom, con:
- Material de la carcasa: Acero inoxidable AISI 316L.
- Material de las juntas: EPDM.
- Conexión al proceso: Tipo Wafer, para montaje entre bridas no
- incluidas en el suministro.
- Tamaño: DN 15 (1/2").
- Material del revestimiento interior del tubo: PFA.
- Temperatura máxima del fluido: -30 a +130 °C.
- Presión máxima de servicio: 20 bar.
- Material de los electrodos de medida: Hastelloy C-276, (sólo Suministrable con el revestimiento de PFA).
- Entrada de cables: Pasacables con rosca M20.
- Caja de bornas: En poliamida

<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 14
<b>EQUIPO:</b> CAUDALÍMETRO ELECTROMAGNÉTICO	
<b>SERVICIO:</b> MEDIDA DE CAUDAL/	Hoja 2 de 2

**CONVERTIDOR**

- Modelo Sitrans FM, tipo Magflo MAG 5000, con Autodiagnóstico, para conectar a los tubos de medida con Campo magnético de corriente continua chopeada, modelos
- MAG 1100, MAG 1100 F, MAG 3100, MAG 3100 W y MAG 5100 W, con: Formato: Precisión de medida: Mejor del 0,5 % del caudal.
- Ajuste del cero: Automático.
- Identificación de tubo vacío: Incluida, automática.
- Salida analógica: 1 de 0/4 a 20 mA.
- Salida digital: 1 de frecuencia de 0 a 10 kHz.
- Salida de pulsos: 1 activa y 1 pasiva para conectar a totalizadores externos o entradas de PLC.
- Salida de relé: 1 de contacto conmutado para señalización de valor límite o estados de funcionamiento.
- Entrada digital: 1, por ejemplo para arranque o puesta a cero de los totalizadores internos.
- Indicador local: Incluido, retroiluminado, alfanumérico, con 3 líneas de 20 caracteres en 11 idiomas seleccionables.
- Totalizadores: Incluidos 2, con 8 dígitos para flujo, reflujo y neto.
- Protección ambiental: IP 67.
- Material de la carcasa: Poliamida reforzada con fibra de vidrio.
- Alimentación eléctrica: 115 - 230 V.c.a, 50/60 Hz.



<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 15
<b>EQUIPO:</b> CONTROLADOR	
<b>SERVICIO:</b> CONTROL DE DATOS	Hoja 1 de 3

**CARACTERÍSTICAS:**

- Marca: HACH LANGE o similar.
- Controlador: LXV400
- Modelo: SC1000.
- Tipo: Conexión de hasta 8 sensores y analizadores digitales de cualquier parametro.
- Capacidad de ampliación para trabajo en red.
- Unidad de display: 1 ud.
- Base de sondas: 1 ud.
- Operación Tecnología intuitiva con pantalla táctil
- Conexión A Base de Sondas SC1000
- Protección IP65
- Temperatura de operación -20 A +55°C
- Dimensiones 200x230x50 mm (WxHxD)
- Peso 1,2 kg aprox.
- Otras prestaciones Interfaz para Servicio y lectura de logger interno
- Slot libre para MMC (tarjeta multimedia)
- Extensiones opcionales Módem tribanda con antena interior para transmisión de datos y control remoto.



**BASE DE SONDAS**

- Entrada: Hasta 8 sondas/analizadores con tecnología digital SC Libremente combinables y configurables
- Sondas adicionales mediante red SC1000
- Rangos de medida Según las sondas/analizadores conectados
- Módulos internos opcionales - tarjeta con 4 relés 5 A 230 Vac
- Tarjeta con 4 salidas analógicas 0/4-20 mA

<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 15
<b>EQUIPO:</b> CONTROLADOR	
<b>SERVICIO:</b> CONTROL DE DATOS	Hoja 2 de 3

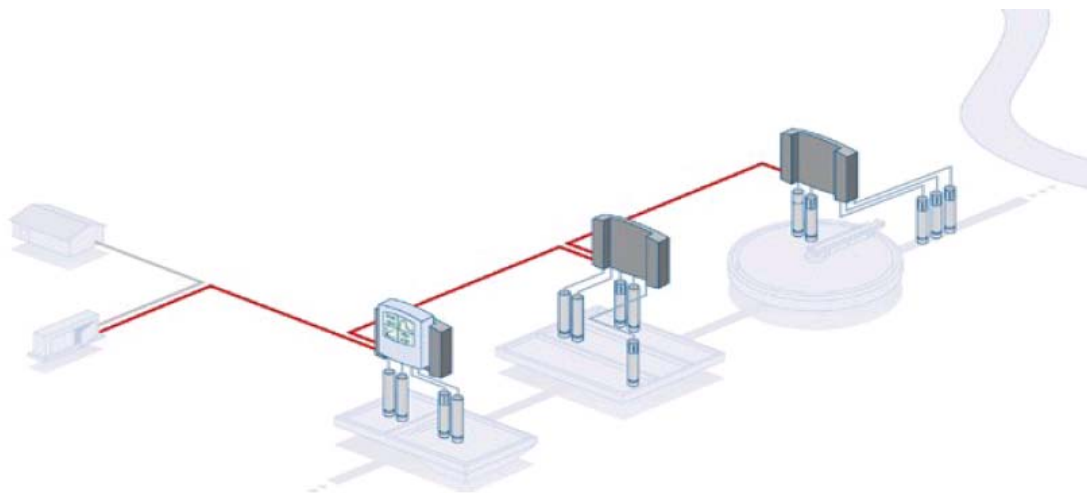
- Tarjeta con 4 entradas analógicas/digitales
- tarjeta de comunicaciones PROFIBUS DP/MODBUS
- Módulos externos opcionales - tarjeta para carril DIN con 4 relés 5 A 230 Vac
- Tarjeta para carril DIN con 2 salidas analógicas 0/4-20 mA
- Tarjeta para carril DIN con 2 entradas analógicas/digitales
- Carcasa Carcasa acero, montaje mural, en tubo o panel
- Protección IP65
- Temperatura de operación -20 a 55°C
- Dimensiones 200x230x50 mm (WxHxD)
- Peso 5,5 kg aprox. según configuración
- Alimentación 100-230 Vac  $\pm 10\%$ , 50/60 Hz, máx 75 VA
- Dimensiones incl. display 315x255x120 mm (WxHxD)

### **FUNCIONAMIENTO**

- Adaptable a cada aplicación: en cada estación de medida, una base de sondas SC 1000 controla hasta ocho sensores digitales simultáneamente en cualquier combinación específica de la aplicación.
- Conexión económica: con el cable de la red SC 1000 se conectan todas las bases de sonda. La red también puede conectarse a un bus de campo.
- Ampliable en cualquier momento: el controlador reconoce automáticamente los nuevos sensores.
- Conectar – parametrizar y ya está. Para una estación de medida adicional, basta con conectar un nuevo módulo de sonda a la red. No se producen gastos de inversión altos ni requiere modificaciones costosas de cableado.
- Manejo intuitivo: el módulo de pantalla SC 1000 portátil muestra los datos de todos los sensores de la red como valores medidos y gráficos.

<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 15
<b>EQUIPO:</b> CONTROLADOR	
<b>SERVICIO:</b> CONTROL DE DATOS	Hoja 3 de 3

- Integrable: tanto los instrumentos de medida existentes como los instrumentos analógicos y los de otros fabricantes se pueden integrar fácilmente en el sistema SC 1000 mediante tarjetas de entradas.
- Los diferentes resultados de medición se pueden convertir a nuevas variables, p. ej. para cálculo de cargas





<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 16
<b>EQUIPO:</b> MEDIDOR DE PH	
<b>SERVICIO:</b> MEDIDA DE PH	Hoja 1 de 2

**CARACTERÍSTICAS:**

- Marca: HACH LANGE o similar.
- Modelo: DPD1
- Material del electrodo: Vidrio, propósito general, con electrodo de referencia mediante electrodo de pH interno y puente salino
- Material de la sonda: RYTON o PEEK según código
- Cuerpo de sonda: Convertible, de inserción o sanitario según código
- Rango de medida: 0 a 14 pH
- Temperatura de muestra: -5 a 50°C
- Tiempo de respuesta: pH < 5s  
Temperatura < 2 min
- Autodiagnóstico Control de impedancia del electrodo de medida y referencia
- Longitud del cable: 10 m (admite prolongación mediante cables de extensión)
- Compensación de temperatura: Automática, sensor NTC
- Protección: IP68
- Calibración: Proceso o solución estándar
- Presión: max. 6,9 bar
- Montaje: Convertible rosca 1" NPT en ambos extremos
- Inserción rosca 1" NPT en extremo posterior
- Sanitario abrazadera 2"
- Dimensiones (aprox.): D x L 35,4 mm x 271,3 mm
- Peso: aprox. 320 g
- Gateway: Gateway interno para conexión a controlador SC



Robusta sonda de pH diferencial digital para su operación con controladores sc100 o sc1000. El sistema patentado de referencia del electrodo pH sc se basa en un segundo

---

<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 16
<b>EQUIPO:</b> MEDIDOR DE PH	
<b>SERVICIO:</b> MEDIDA DE PH	Hoja 2 de 2

electrodo de pH interno en contacto con el fluido analizado a través de un puente salino. De esta manera se imposibilita la contaminación del electrodo de referencia. El puente salino es mucho menos sensible a la suciedad que los diafragmas convencionales, reduciendo así los trabajos de limpieza y previniendo la dilución del electrolito. Por consiguiente la vida útil del electrodo es mucho mayor que en los sensores convencionales.

Disponible en formato *convertible* con rosca en ambos extremos, *de inserción* con rosca solo en el extremo posterior, y *sanitario* para montaje en abrazadera.

También está disponible en varios materiales para compatibilidad química con la muestra. Incluye gateway interno y 10 m. de cable para conexión a un controlador SC (SC60, SC100 ó SC1000).

<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 17
<b>EQUIPO:</b> SENSOR INDUCTIVO DE CONDUCTIVIDAD	
<b>SERVICIO:</b> MEDIDA DE CONDUCTIVIDAD	Hoja 1 de 1

**CARACTERÍSTICAS:**

- Marca: HACH LANGE o similar.
- Modelo: LXV428
- Método de medición: Inductivo
- Sensor de temperatura: Pt100
- Rango de medida: Conductividad 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ /2,5 S/cm
- Temperatura  $-5/+60^{\circ}\text{C}$
- Temperatura de muestra: -5 a 50 $^{\circ}\text{C}$
- Tiempo de respuesta: Conductividad T90 < 15s
- Temperatura T90 < 2 min
- Velocidad máx. de la muestra: 4 m/s
- Compensación de temperatura: Automática o manual
- Protección: IP68
- Calibración: Manual en 1 punto o eléctrica
- Presión: max. 2 bar
- Montaje: Inmersión 1" NPT en extremo posterior
- Dimensiones (aprox.): D x L 42 x 360 mm
- Peso: aprox. 1 kg
- Longitud del cable: 10 m (admite prolongación mediante cables de extensión)
- Gateway: Gateway interno para conexión a controlador SC



**MATERIAL:**

- Sonda: Cuerpo en acero inoxidable
- Sensor: PEEK

<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 18
<b>EQUIPO:</b> SENSOR DE MEDIDA DE OXÍGENO DISUELTO	
<b>SERVICIO:</b> MEDIDA DE OXÍGENO	Hoja 1 de 2

**CARACTERÍSTICAS:**

- Marca: HACH LANGE o similar.
- Modelo: LXV416
- Principio de medida: Luminiscencia
- Rango de medida de oxígeno: 0,1/20,00 mg/l,  
0,1/20,00 ppm,  
1/200 % de saturación
- Rango de medida de temperatura: 0,1 a 50°C
- Exactitud: ±0,1 mg/l, O<sub>2</sub> < 1 mg/l
- Repetibilidad: 0,05 mg/l
- Tiempo de respuesta: T<sub>90</sub> < 30 s (20°C)  
T<sub>95</sub> < 90 s (20°C)
- Temperatura de muestra: 0 a 50°C
- Longitud del cable: 10 m (admite prolongación mediante cables de extensión)
- Compensación de temperatura: Automática, sensor NTC
- Calibración No se requiere
- Caudal mínimo de muestra No se requiere
- Material NORYL y acero inoxidable 1.4401
- Dimensiones (aprox.): D x L 60 mm x 290 mm
- Peso: aprox. 1,4 kg



El sensor de proceso para la medida de oxígeno LDO se basa en un principio óptico completamente nuevo. La medición se realiza sobre una película luminiscente sensible al oxígeno que se excita mediante un diodo luminoso de color azul. Después de la excitación, la película luminiscente emite un pulso de luz roja.

<b>OBRA:</b> ELECTROCOAGULACIÓN	<b>CÓDIGO:</b> 18
<b>EQUIPO:</b> SENSOR DE MEDIDA DE OXÍGENO DISUELTO	
<b>SERVICIO:</b> MEDIDA DE OXÍGENO	Hoja 2 de 2

El tiempo de duración de este pulso reemitido corresponde a la concentración de oxígeno.

La medida de este tiempo no deriva debido a factores del proceso, de modo que el sensor LDO no necesita calibración por parte del usuario, limitando la necesidad de mantenimiento a limpiezas espaciadas y la sustitución cada 2 años de la cápsula del sensor. Al contrario de los sensores electroquímicos no se consume oxígeno en este método

Por lo tanto, la medición es más resistente a los depósitos de suciedad. Asimismo, la velocidad de flujo no influye tampoco en la fiabilidad de los valores de medición. El sensor LANGE LDO es completamente inmune contra contaminantes de electrodo como H<sub>2</sub>S o CO<sub>2</sub>, los cuales contaminan o incluso destruyen los tradicionales sensores polarográficos de O<sub>2</sub>. El sensor no requiere un período de polarización, proporcionando lecturas válidas desde su conexión. Requiere conexión a un controlador SC (SC100 ó SC1000).



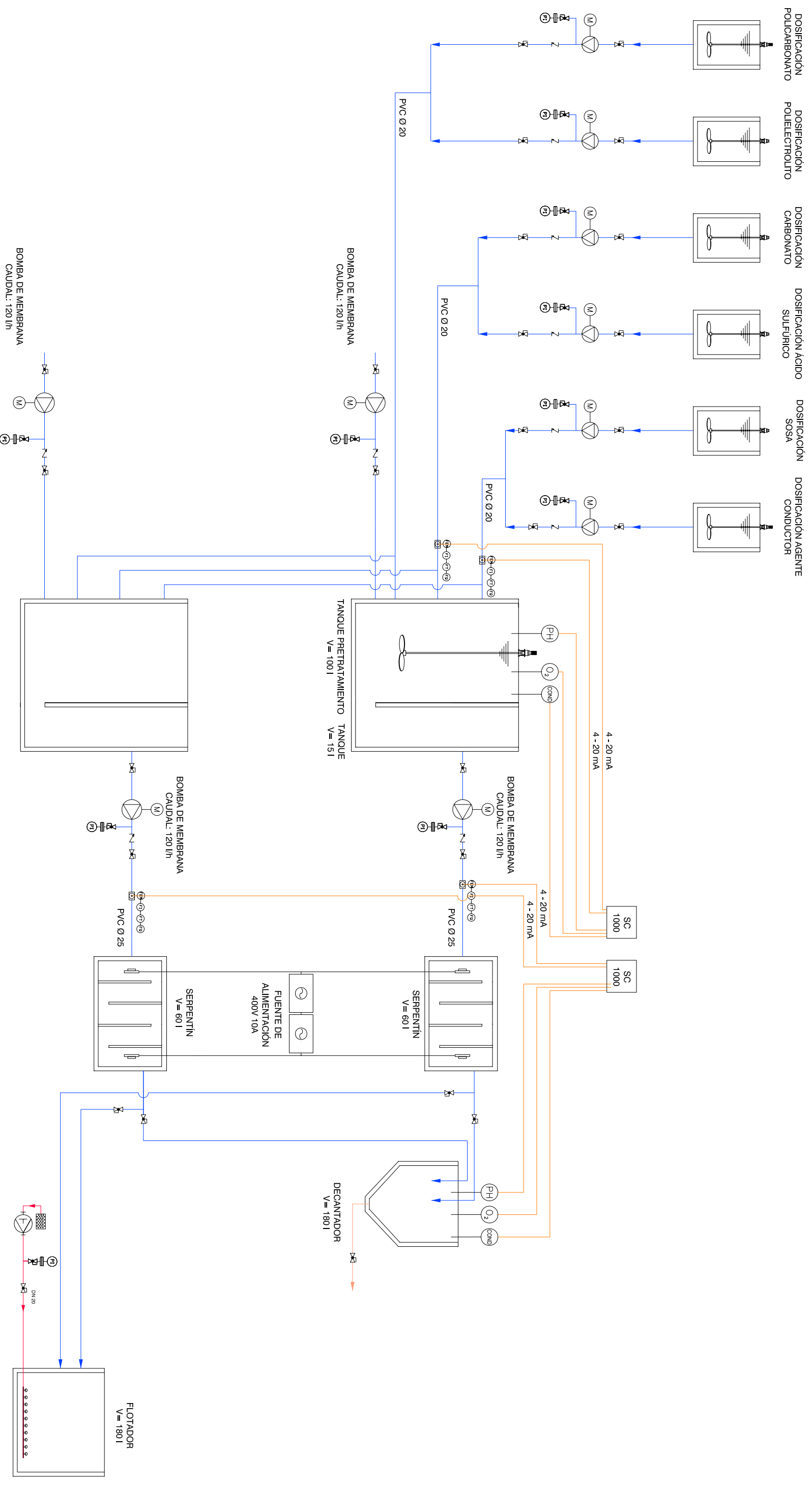
## **PLANOS DE LA PLANTA**





## INDICE

PLANO Nº1: ESQUEMA FUNCIONAL  
PLANO Nº2: PLANTA GENERAL. FORMAS  
PLANO Nº3: PLANTA GENERAL. EQUIPOS  
PLANO Nº4: SECCIÓN A-A. FORMAS  
PLANO Nº5: SECCIÓN A-A. EQUIPOS  
PLANO Nº6: SECCIÓN B-B. FORMAS  
PLANO Nº7: SECCIÓN B-B. EQUIPOS  
PLANO Nº8: SECCION C-C. FORMAS  
PLANO Nº9: SECCIÓN C-C. EQUIPOS  
PLANO Nº10: DEPÓSITO DE REACTIVOS. PLANTA, ALZADOS Y SECCIONES. FORMAS  
PLANO Nº11: DEPÓSITO DE REACTIVOS. PLANTA, ALZADOS Y SECCIONES. EQUIPOS  
PLANO Nº12: TANQUE AGITADOR. PLANTA, ALZADOS Y SECCIONES. FORMAS  
PLANO Nº13: TANQUE AGITADOR. PLANTA, ALZADOS Y SECCIONES. EQUIPOS  
PLANO Nº14: SERPENTÍN. ALZADOS Y SECCIONES.FORMAS  
PLANO Nº15: SERPENTÍN. SECCIONES.FORMAS  
PLANO Nº16: SERPENTÍN. SECCIONES.EQUIPOS  
PLANO Nº17: DECANTADOR – FLOTADOR. FORMAS  
PLANO Nº18: DECANTADOR – FLOTADOR. EQUIPOS  
PLANO Nº19: EQUIPOS  
PLANO Nº20: ESQUEMA UNIFILAR

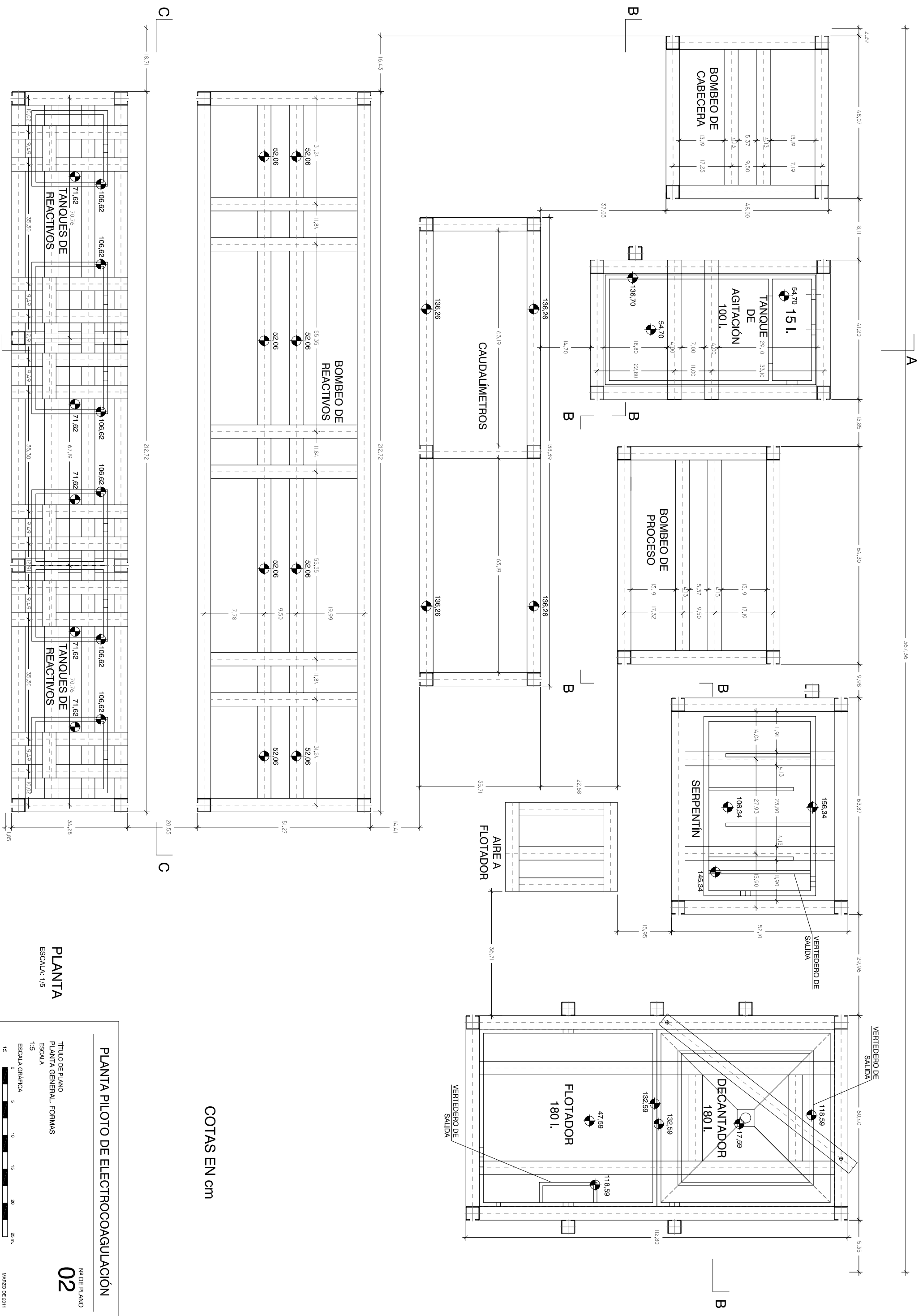


**PLANTA PILOTO DE ELECTROCOAGULACION**

TITULO DE PLANO  
 ESQUEMA FUNCIONAL  
 ESCALA  
 S.E.  
 ESCALA GRAFICA

Nº DE PLANO  
**01**

MARZO DE 2011



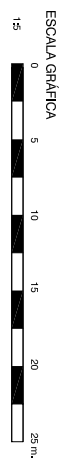
COTAS EN cm

PLANTA  
ESCALA: 1/5

PLANTA PILOTO DE ELECTROCOAGULACION

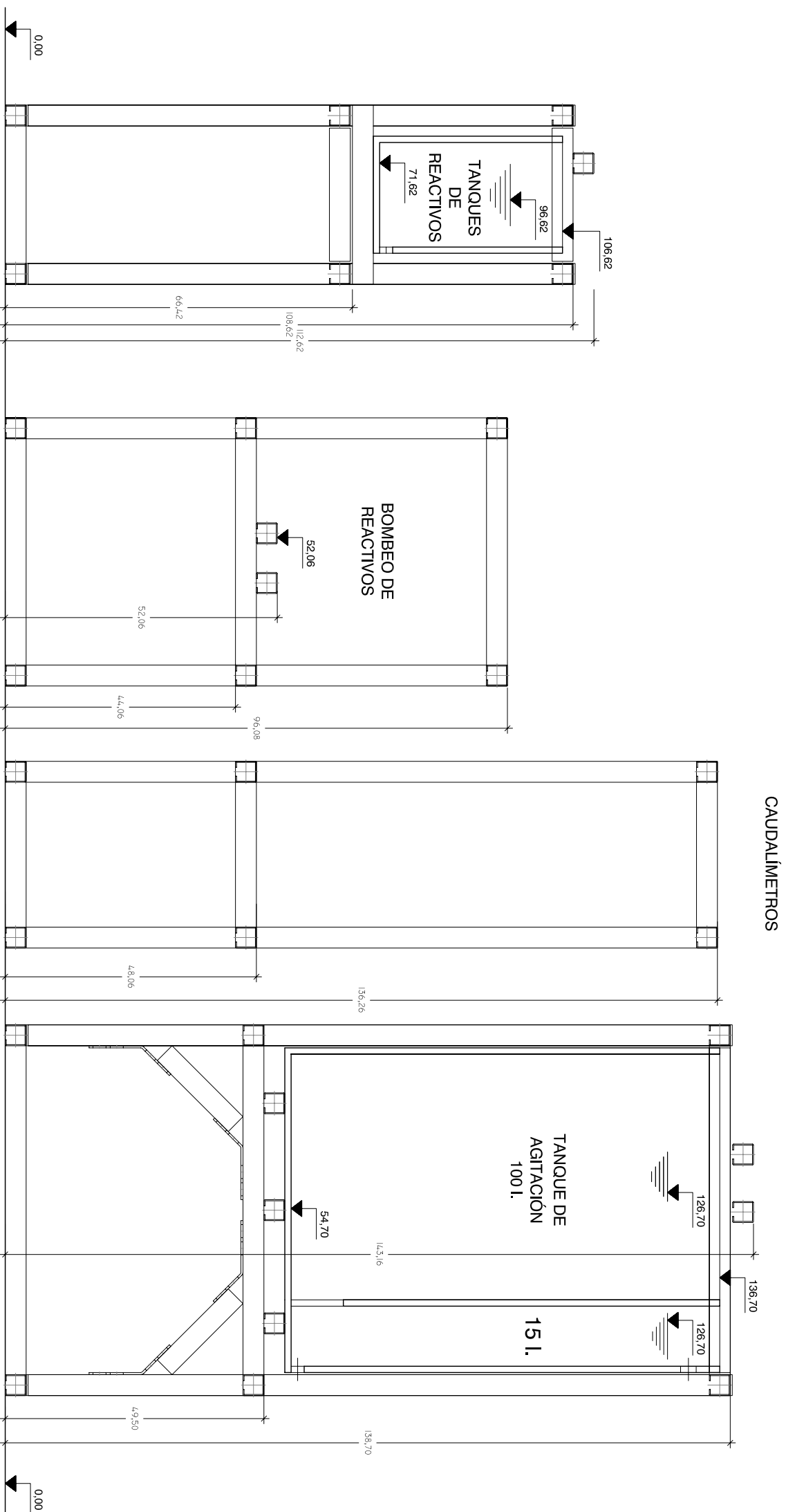
Nº DE PLANO  
**02**

TITULO DE PLANO  
PLANTA GENERAL. FORMAS  
ESCALA  
1-5  
ESCALA GRAFICA



MARZO DE 2011





**SECCIÓN A-A**  
ESCALA: 1/10

COTAS EN cm

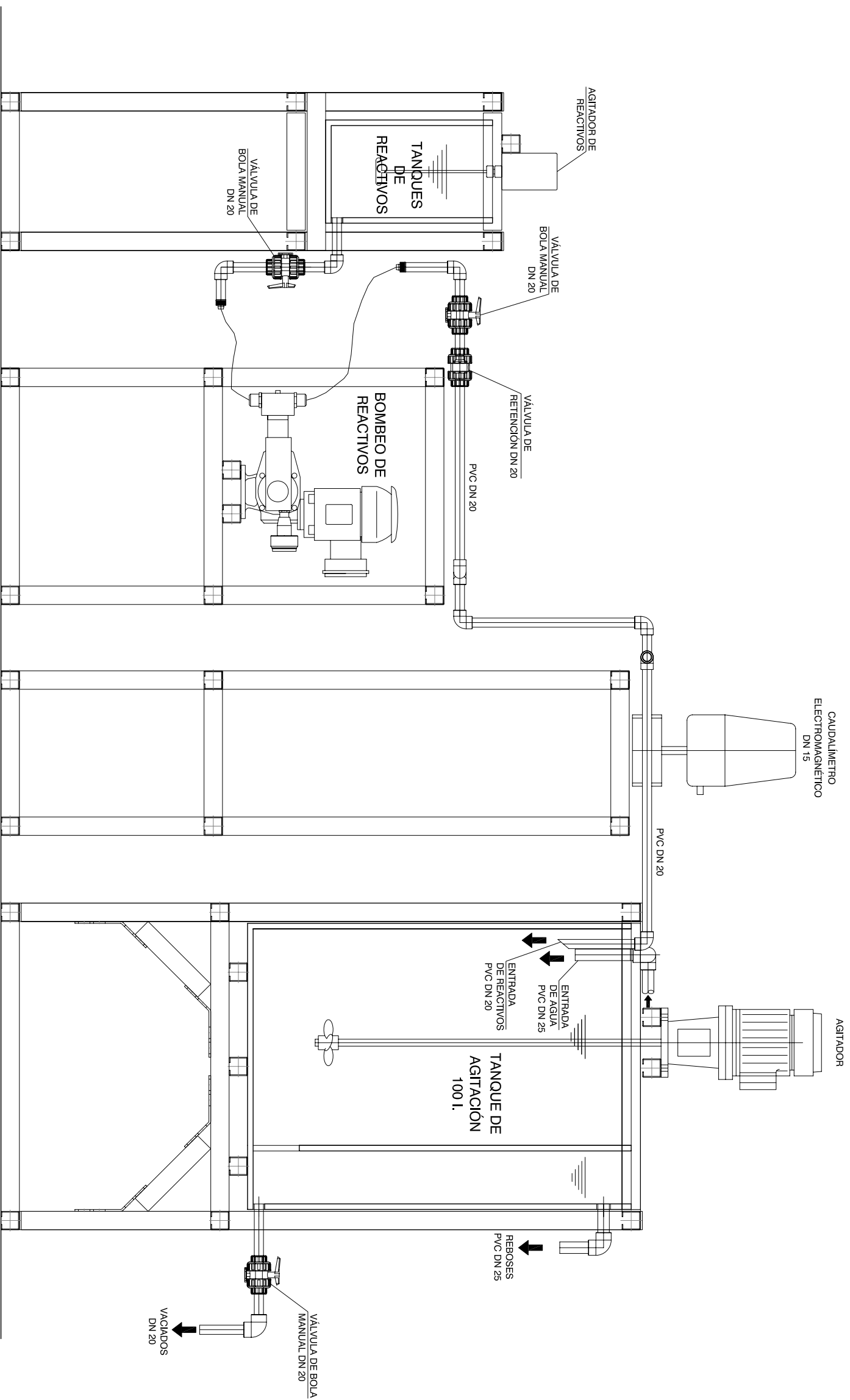
PLANTA PILOTO DE ELECTROCOAGULACIÓN

Nº DE PLANO  
**04**

TÍTULO DE PLANO  
SECCIÓN A-A, FORMAS  
ESCALA  
1:10  
ESCALA GRÁFICA



MARZO DE 2011



**SECCIÓN A-A**  
ESCALA: 1/10

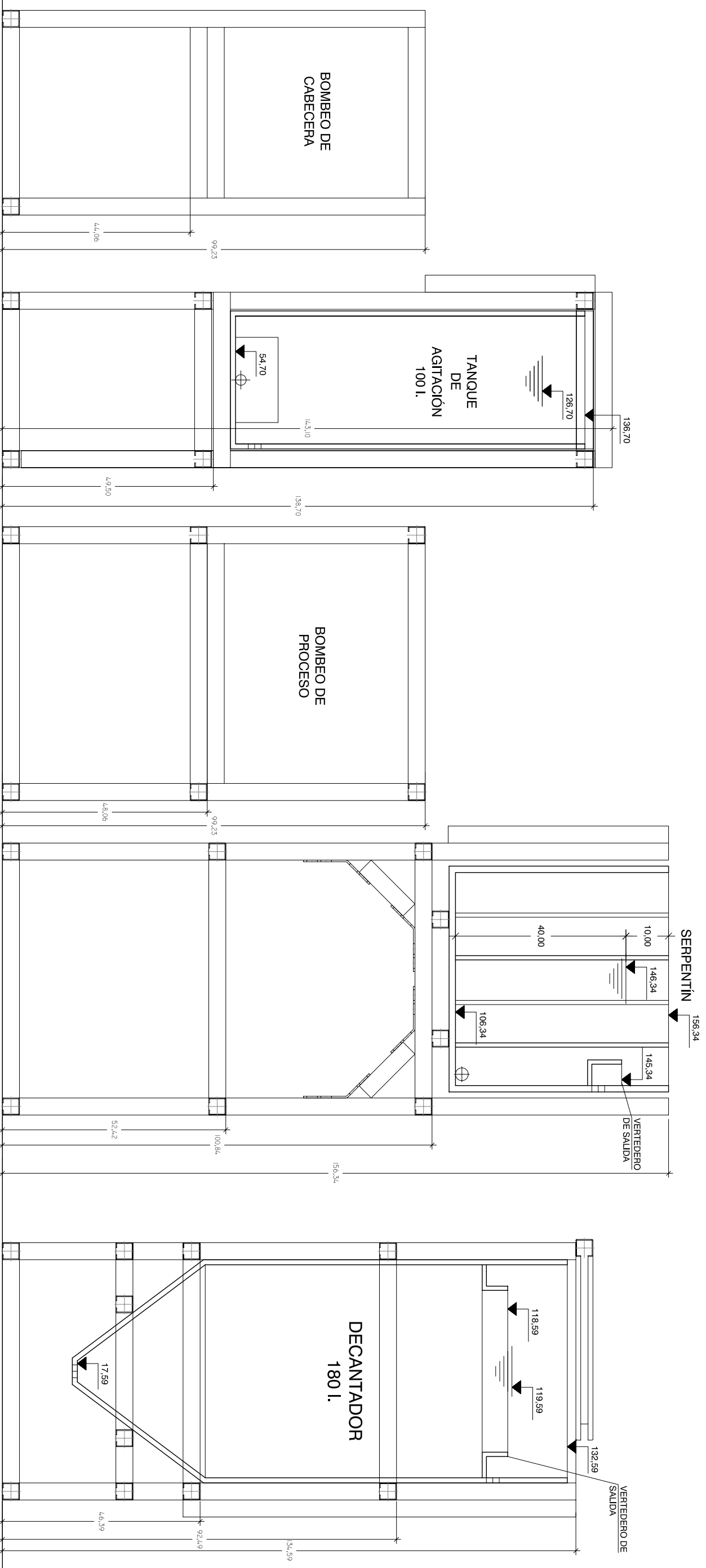
**PLANTA PILOTO DE ELECTROCOAGULACIÓN**

TÍTULO DE PLANO  
SECCIÓN A-A. EQUIPOS  
ESCALA  
1:10  
ESCALA GRÁFICA

0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 m

Nº DE PLANO  
**05**

MARZO DE 2011



**SECCIÓN B-B**  
ESCALA: 1/10

COTAS EN cm

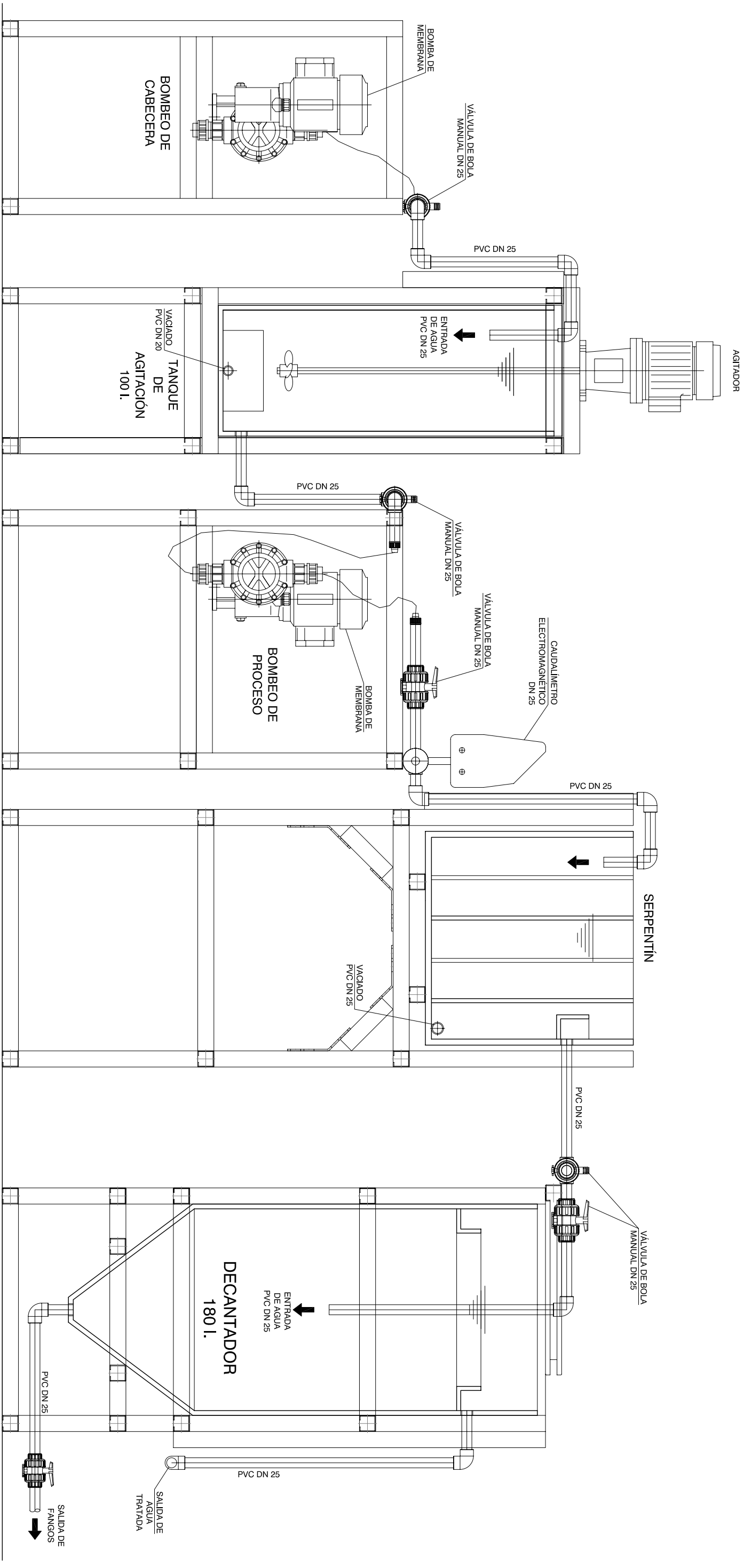
PLANTA PILOTO DE ELECTROCOAGULACIÓN

Nº DE PLANO  
**06**

TÍTULO DE PLANO  
SECCIÓN B-B, FORMAS  
ESCALA  
1:10  
ESCALA GRÁFICA



MARZO DE 2011



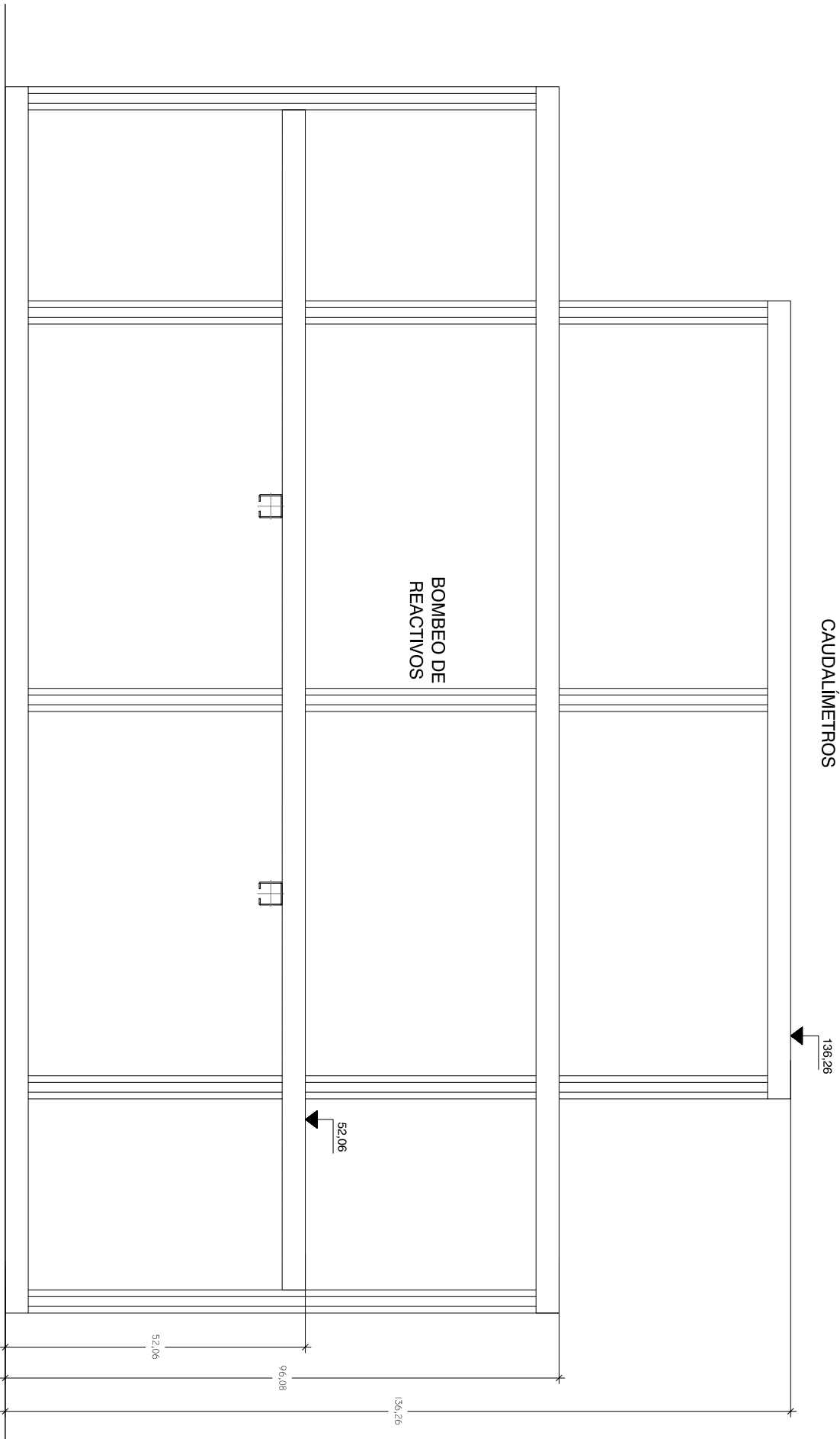
**SECCIÓN B-B**  
ESCALA: 1/10

**PLANTA PILOTO DE ELECTROCOAGULACIÓN**

Nº DE PLANO  
**07**

TÍTULO DE PLANO  
SECCIÓN B-B, EQUIPOS  
ESCALA  
1:10  
ESCALA GRÁFICA  
0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 m  
MARZO DE 2011





**SECCIÓN C-C**  
 ESCALA: 1/10

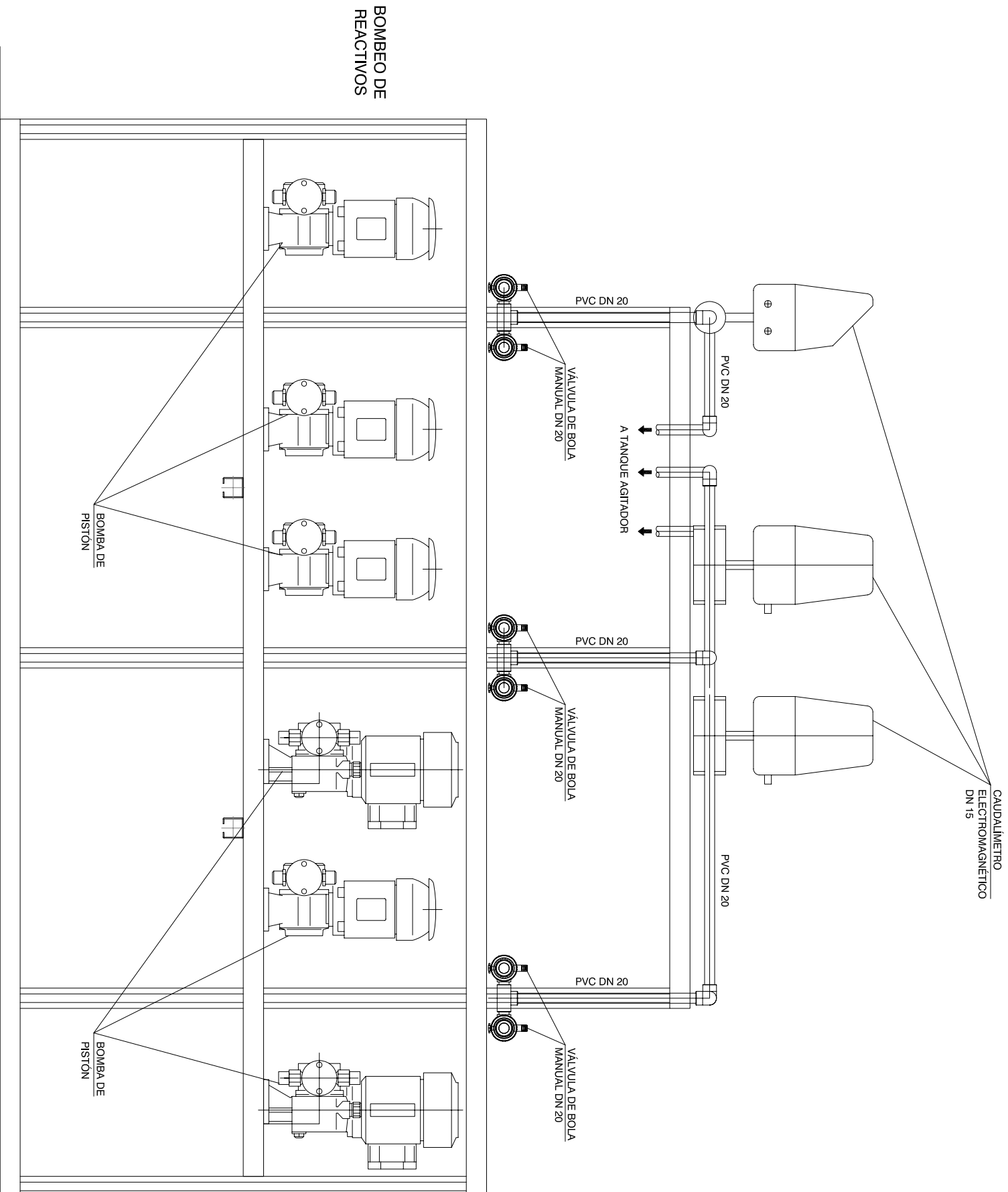
COTAS EN cm

PLANTA PILOTO DE ELECTROCOAGULACIÓN

Nº DE PLANO  
**08**

TÍTULO DE PLANO  
 SECCIÓN C-C: FORMAS  
 ESCALA  
 1:10  
 ESCALA GRÁFICA  
 1:10

MARZO DE 2011



**SECCIÓN C-C**  
 ESCALA: 1/10

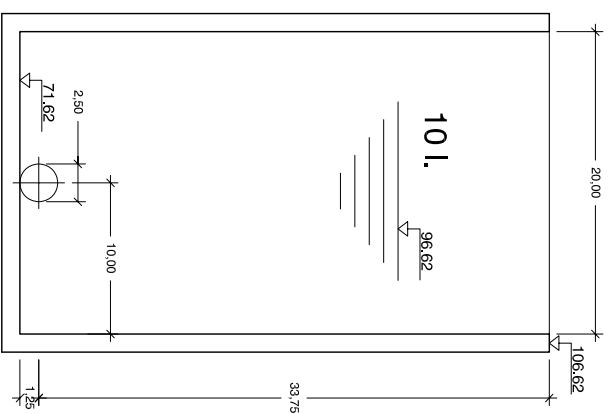
**PLANTA PILOTO DE ELECTROCOAGULACIÓN**

Nº DE PLANO  
**09**

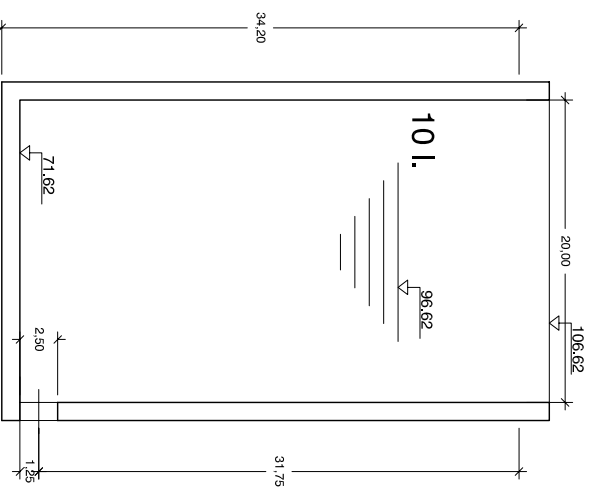
TÍTULO DE PLANO  
 SECCIÓN C-C: EQUIPOS  
 ESCALA  
 1:10  
 ESCALA GRÁFICA



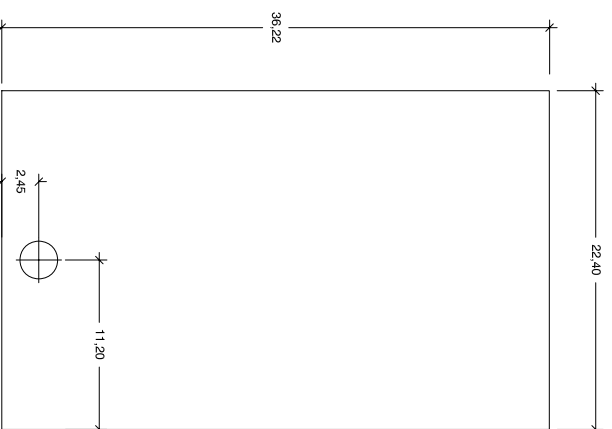
MARZO DE 2011



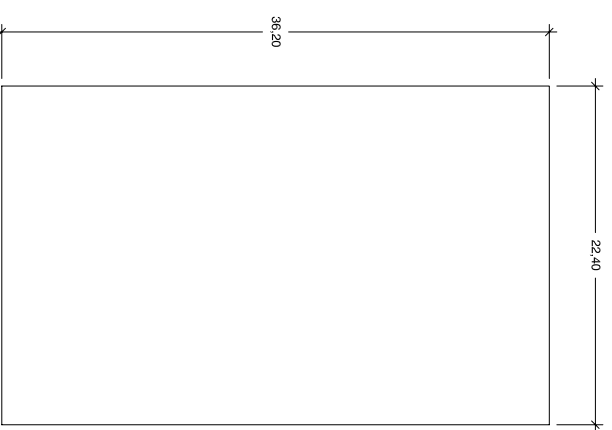
SECCIÓN A-A  
ESCALA 1/5



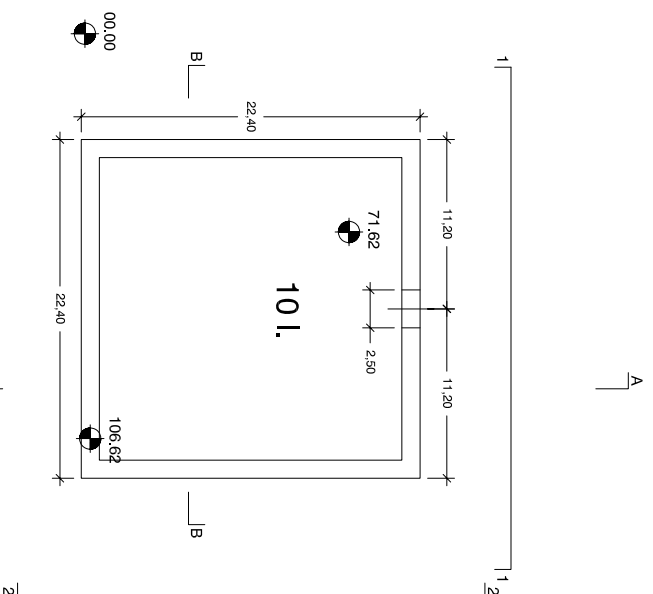
SECCIÓN B-B  
ESCALA 1/5



ALZADO 1-1  
ESCALA 1/5



ALZADO 2-2  
ESCALA 1/5



PLANTA  
ESCALA 1/5

COTAS EN cm  
ESPESOR DEL  
METACRILATO 12 mm

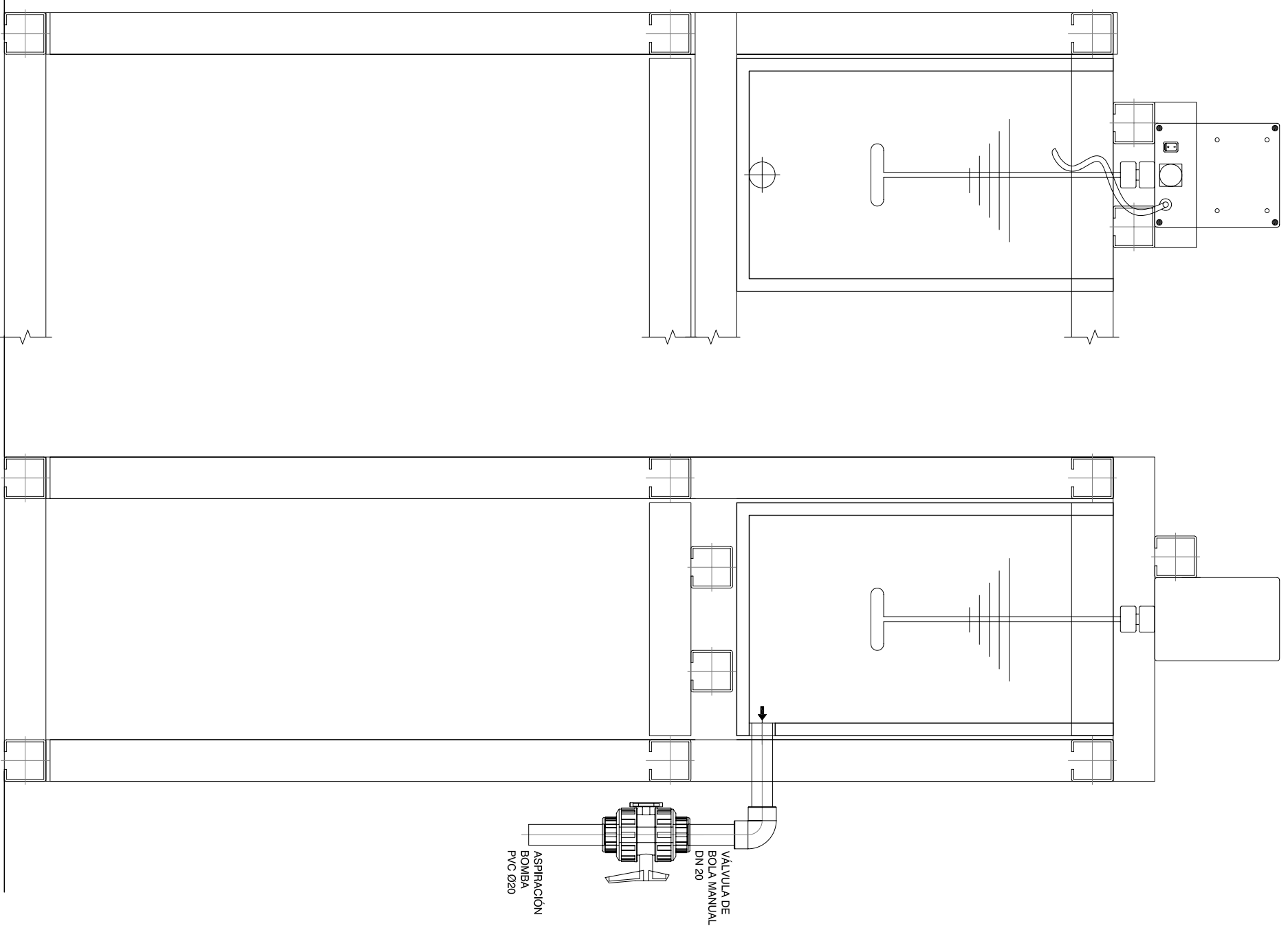
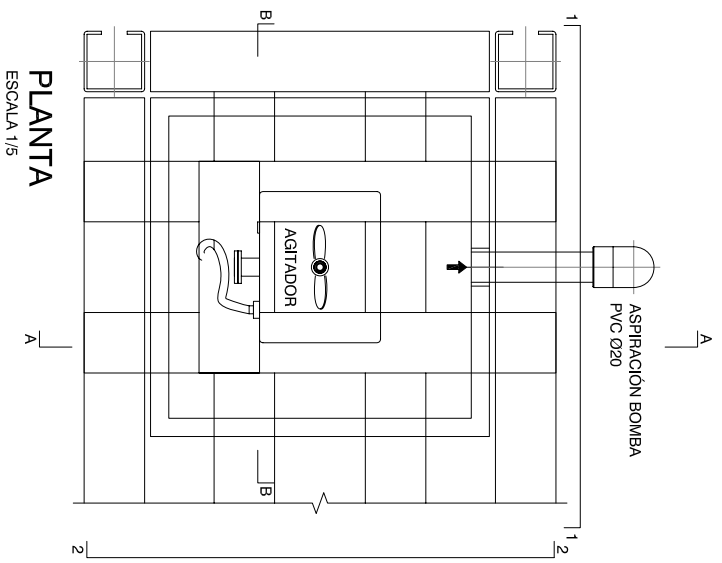
PLANTA PILOTO DE ELECTROCOAGULACIÓN

TÍTULO DE PLANO  
DEPÓSITO DE REACTIVOS. PLANTA. ALZADOS Y SECCIONES. FORMAS  
ESCALA  
1-5  
ESCALA GRÁFICA

Nº DE PLANO  
**10**

ESCALA GRÁFICA 0 5 10 15 20 25 m.  
MARZO DE 2011

# DEPOSITO DE REACTIVOS



## PLANTA PILOTO DE ELECTROCOAGULACION

TITULO DE PLANO  
DEPOSITO DE REACTIVOS, PLANTA Y SECCIONES, EQUIPOS

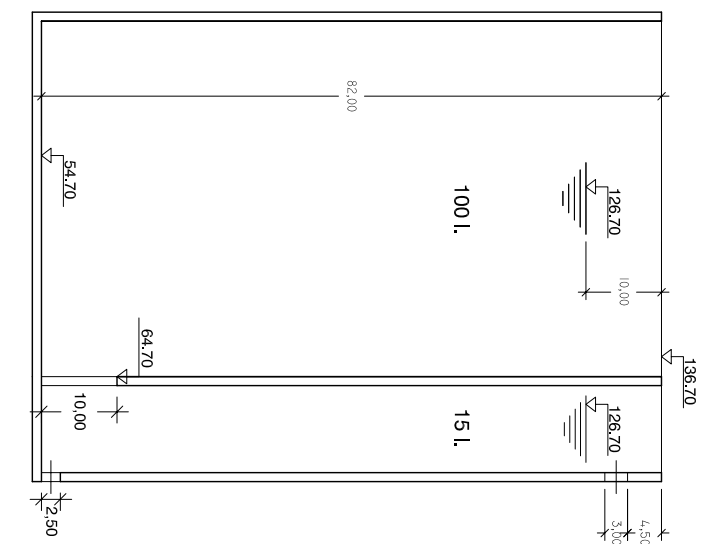
Nº DE PLANO  
**11**

ESCALA  
1:5

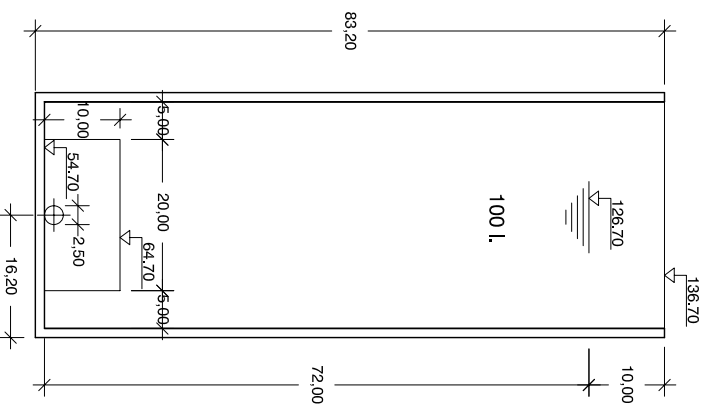
ESCALA GRAFICA



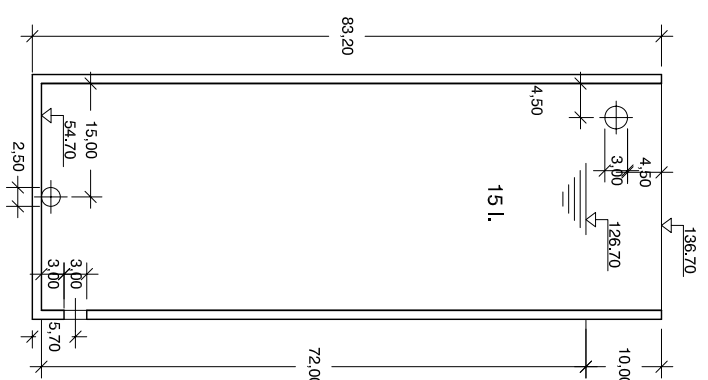
MARZO DE 2011



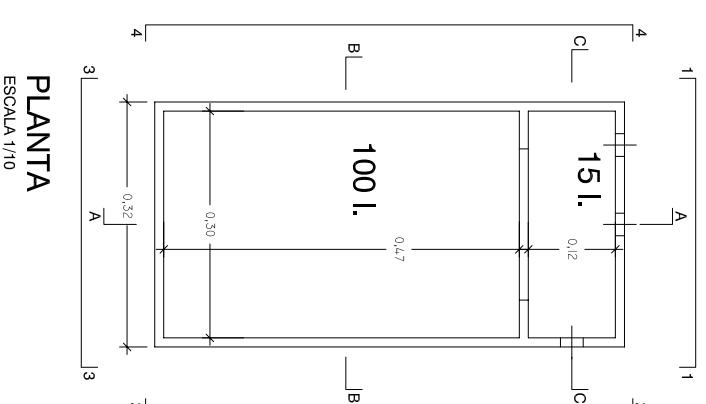
**SECCIÓN A-A**  
ESCALA 1/10



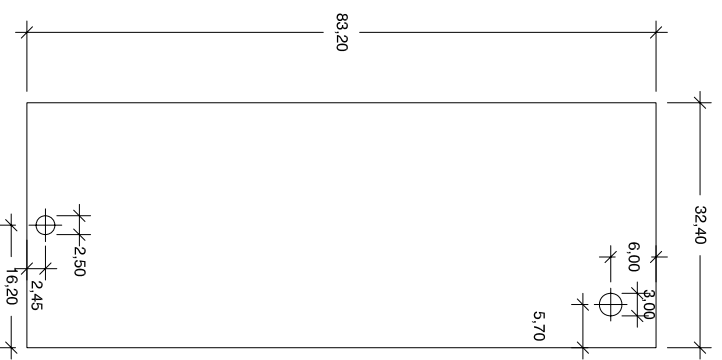
**SECCIÓN B-B**  
ESCALA 1/10



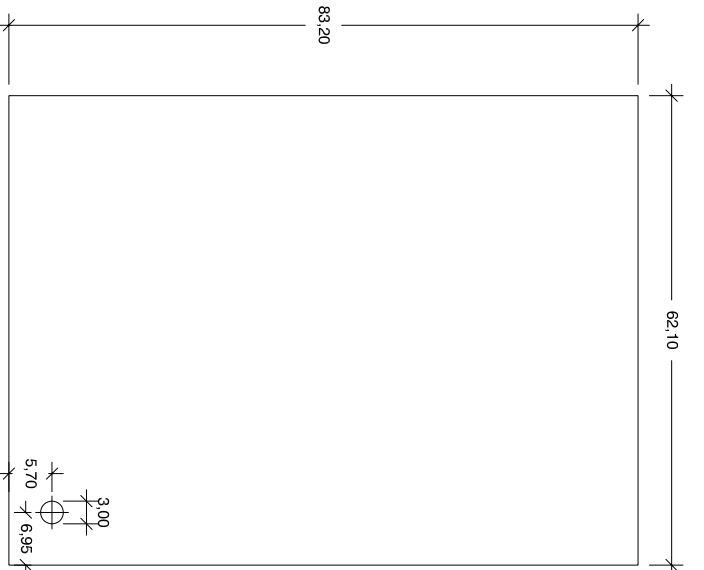
**SECCIÓN C-C**  
ESCALA 1/10



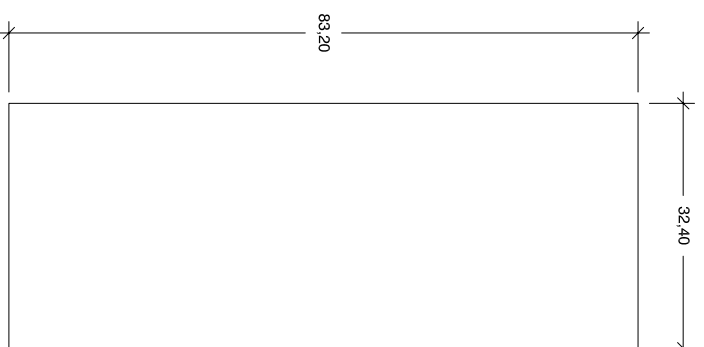
**PLANTA**  
ESCALA 1/10



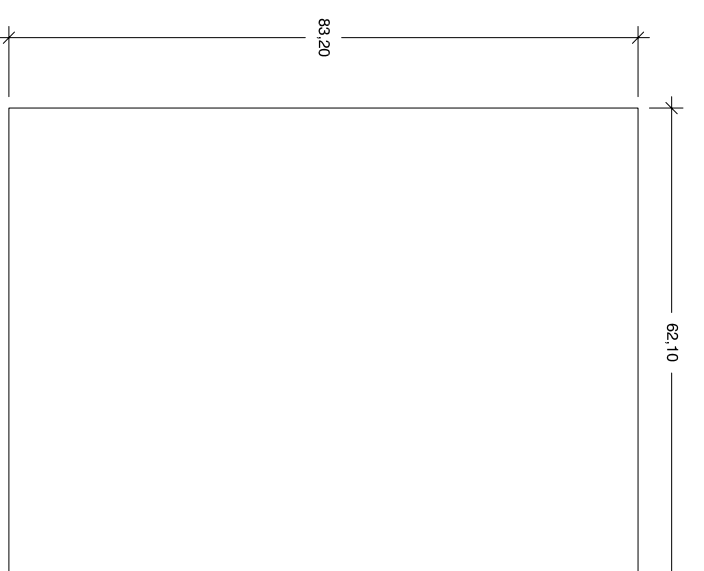
**ALZADO 1-1**  
ESCALA 1/10



**ALZADO 2-2**  
ESCALA 1/10



**ALZADO 3-3**  
ESCALA 1/10



**ALZADO 4-4**  
ESCALA 1/10

**COTAS EN cm**  
**ESPESOR DEL METACRILATO 12 mm**

**PLANTA PILOTO DE ELECTROCOAGULACIÓN**

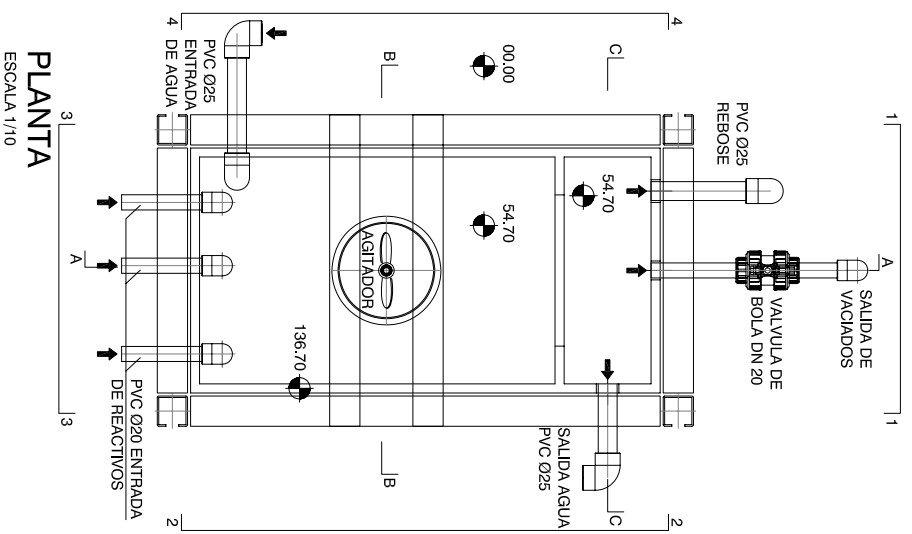
Nº DE PLANO  
**12**

TÍTULO DE PLANO  
TANQUE AGITADOR. PLANTA, ALZADOS Y SECCIONES. FORMAS  
ESCALA  
1-10  
ESCALA GRÁFICA

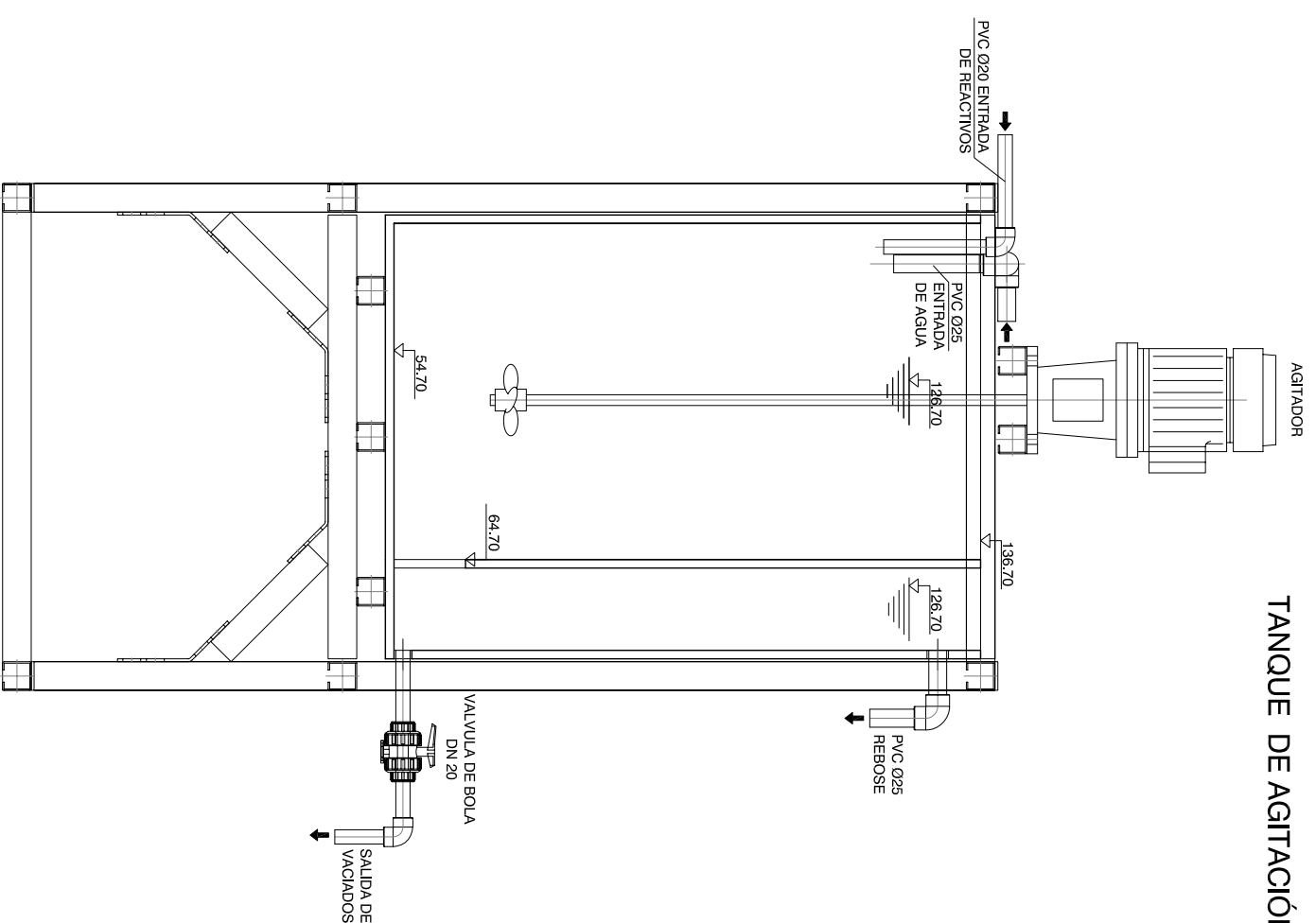


MARZO DE 2011

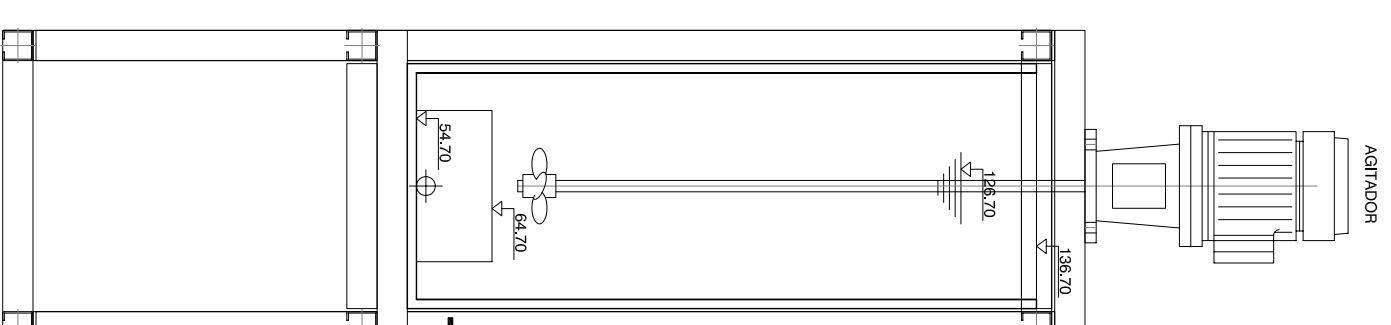
# TANQUE DE AGITACIÓN



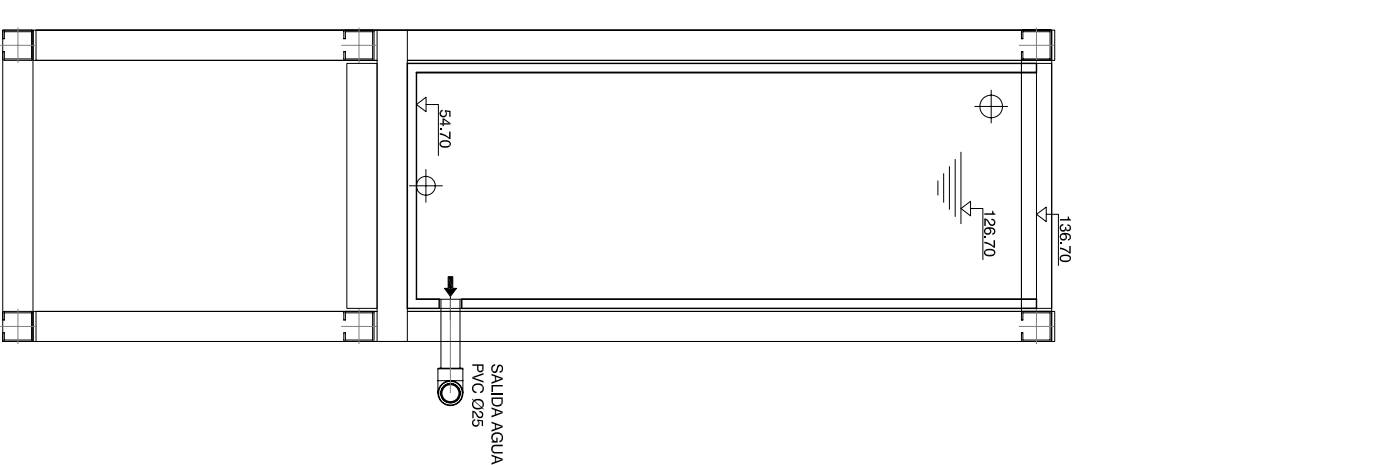
**PLANTA**  
ESCALA 1/10



**SECCIÓN A-A**  
ESCALA 1/10



**SECCIÓN B-B**  
ESCALA 1/10



**SECCIÓN C-C**  
ESCALA 1/10

COTAS EN cm  
**ESPESOR DEL METACRILATO 12 mm**

## PLANTA PILOTO DE ELECTROCOAGULACIÓN

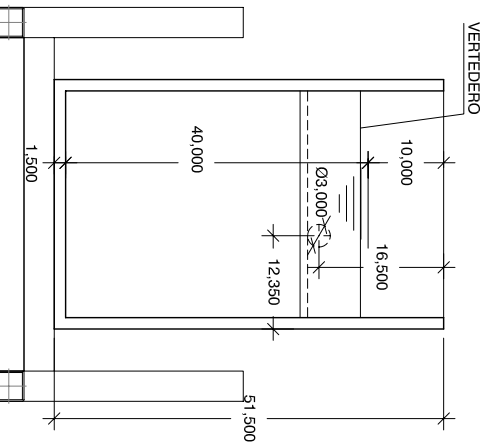
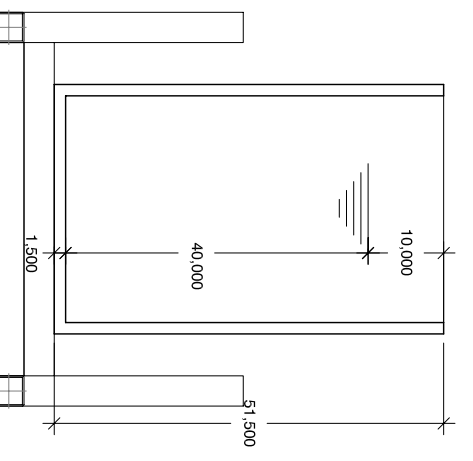
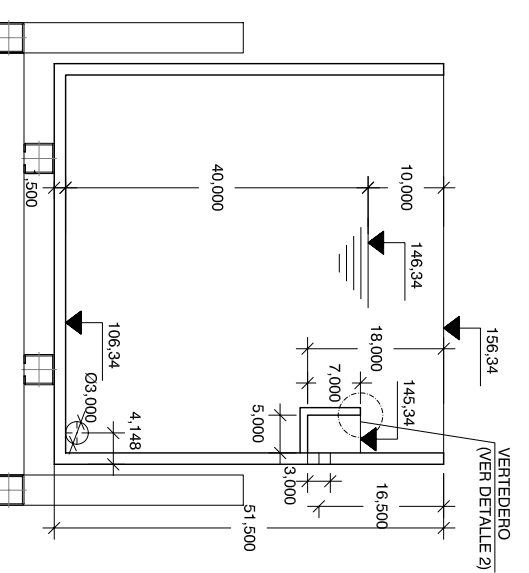
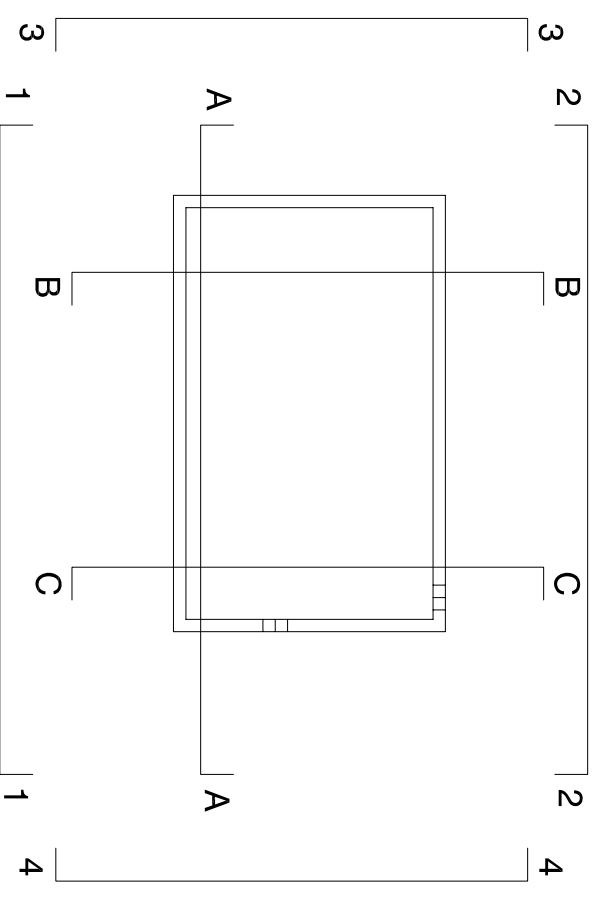
TÍTULO DE PLANO  
 TANQUE AGITADOR, PLANTA Y SECCIONES EQUIPOS  
 ESCALA 1:10

Nº DE PLANO  
**13**

ESCALA GRÁFICA  
 1:10  
 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 m

MARZO DE 2011





0,00

**SECCIÓN A-A**  
ESCALA: 1/10

**SECCIÓN B-B**  
ESCALA: 1/10

**SECCIÓN C-C**  
ESCALA: 1/10

COTAS EN cm

**PLANTA PILOTO DE ELECTROCOAGULACIÓN**

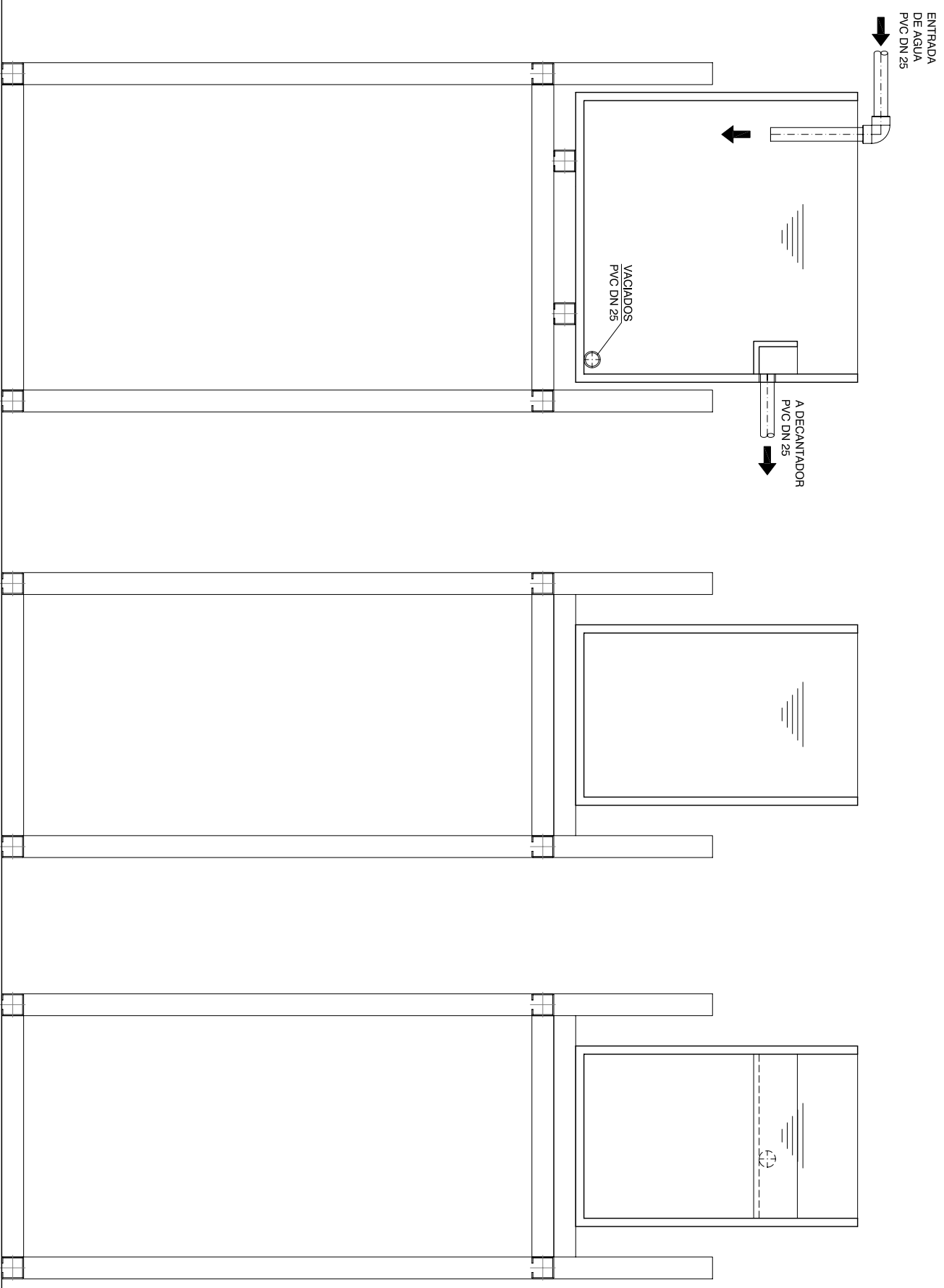
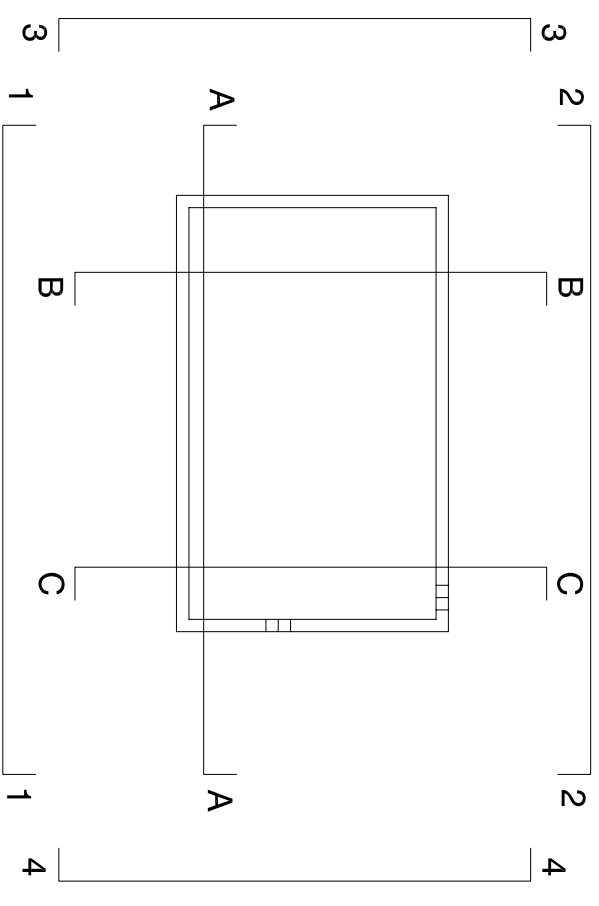
TÍTULO DE PLANO  
SERPENTIN, SECCIONES, FORMAS  
ESCALA  
1:10  
ESCALA GRÁFICA

Nº DE PLANO  
**15**



MARZO DE 2011





SECCIÓN A-A  
ESCALA: 1/10

SECCIÓN B-B  
ESCALA: 1/10

SECCIÓN C-C  
ESCALA: 1/10

**PLANTA PILOTO DE ELECTROCOAGULACIÓN**

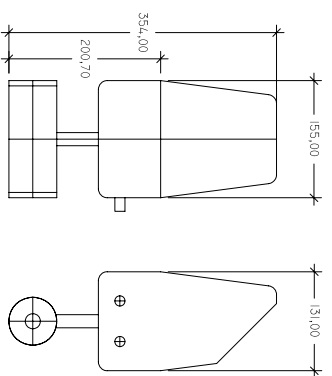
TÍTULO DE PLANO  
SERPENTIN, SECCIONES, EQUIPOS  
ESCALA  
1:10  
ESCALA GRÁFICA  
1:10  
MARZO DE 2011

Nº DE PLANO  
**16**

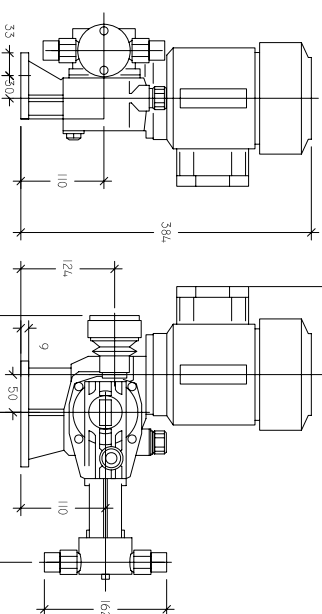




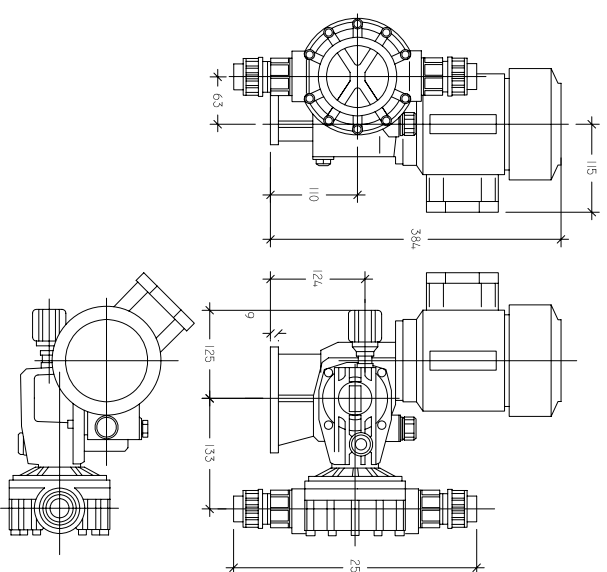
**CAUDALÍMETRO  
ELECTROMAGNÉTICO**



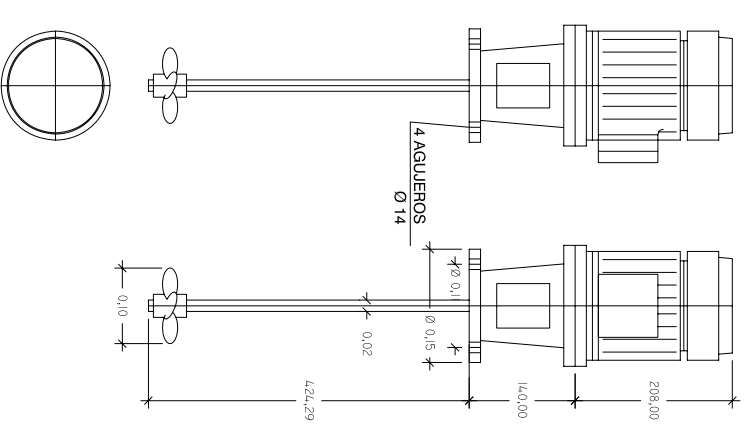
**BOMBA DE PISTÓN  
(BOMBEO DE REACTIVOS)**



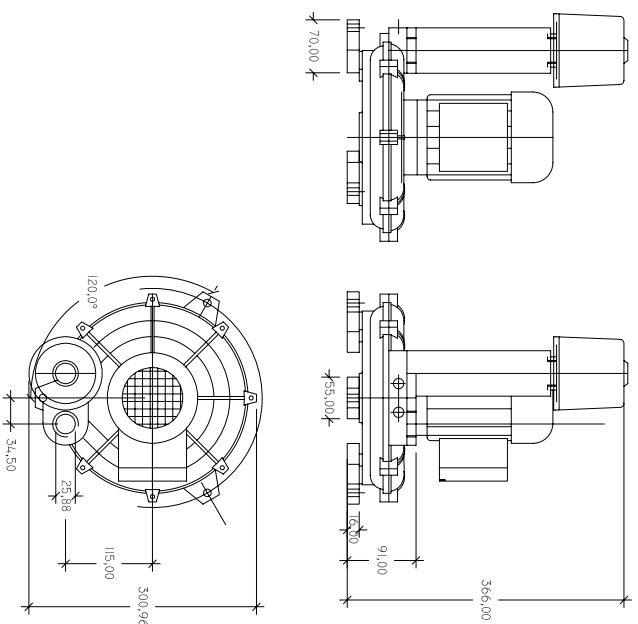
**BOMBA DE MEMBRANA  
(BOMBEO DE PROCESO Y  
BOMBEO DE CABECERA)**



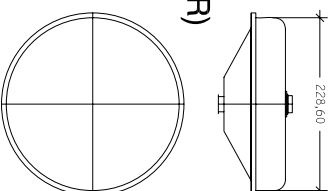
**AGITADOR DE MEZCLA**



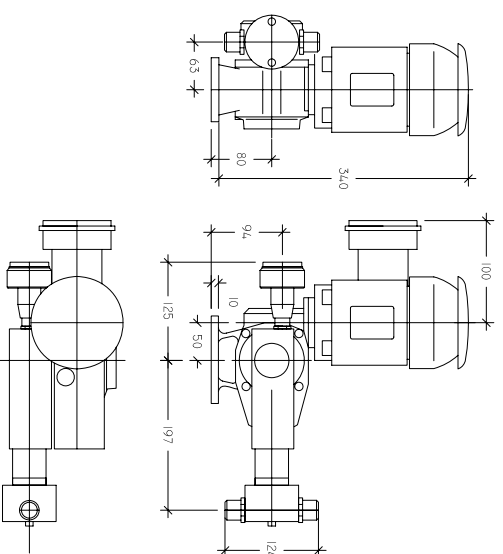
**SOPLANTE DE CANAL LATERAL  
(AIRE A FLOTADOR)**



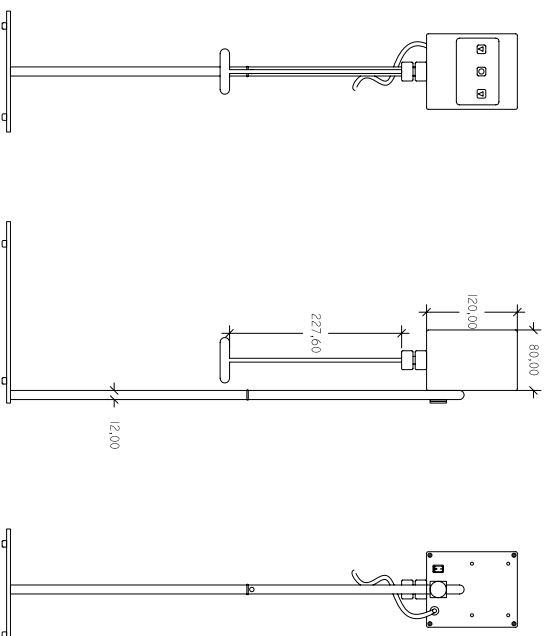
**DIFUSOR DE  
BURBUJA FINA  
(AIRE A FLOTADOR)**



**BOMBA DE PISTÓN  
(BOMBEO DE REACTIVOS)**



**AGITADOR DE REACTIVOS**



COTAS EN MILÍMETROS

**PLANTA PILOTO DE ELECTROCOAGULACIÓN**

TÍTULO DE PLANO  
EQUIPOS  
ESCALA  
S.E.  
ESCALA GRÁFICA

Nº DE PLANO  
**19**

MARZO DE 2011

