

MANUAL DE INCREMENTO DE EFICIENCIA FÍSICA, HIDRÁULICA Y ENERGÉTICA EN SISTEMAS DE AGUA POTABLE



Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable

Comisión Nacional del Agua

Advertencia

Se autoriza la reproducción sin alteraciones del material contenido en esta obra, sin fines de lucro y citando la fuente. Esta publicación forma parte de los productos generados por la Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento de la Comisión Nacional del Agua.

Título: Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable

ISBN: 978-607-7908-68-5

Edición 2012

Autor: Comisión Nacional del Agua
Insurgentes Sur No. 2416 Col. Copilco El Bajo
C.P. 04340, Coyoacán, México, D.F.
Tel. (55) 5174-4000
www.conagua.gob.mx

Editor: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209 Col. Jardines de la Montaña,
C.P 14210, Tlalpan, México, D.F.

Algunas de las imágenes utilizadas dentro del documento fueron tomadas de diferentes publicaciones y/o páginas web, únicamente con fines ilustrativos y didácticos.

Agradecimientos:

En la preparación de este Manual se tomaron como base el estado y operación de las instalaciones de agua potable de diferentes organismos operadores de la República Mexicana y las acciones que han realizado para lograr un incremento de eficiencia, así como la experiencia del personal de la Comisión Nacional del Agua que ha participado en el diseño, construcción y operación de instalaciones electromecánicas en los sistemas de agua.

Comentarios:

Para comentarios del presente manual, favor de comunicarse a los siguientes correos y/o teléfonos de la Gerencia de Fortalecimiento de Organismos Operadores:

eduardo.ibanez@conagua.gob.mx y/o hector.martinez@conagua.gob.mx
Teléfono: (55) 51744000 Ext. 1346, 1347 y 1844

Impreso en México

Distribución gratuita. Prohibida su venta.

Queda prohibido el uso para fines distintos al desarrollo social.

Contenido

Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable

Presentación	
Definiciones y simbología	
Introducción	1
Sección 1 Generación de datos básicos	3
1.1 Recopilación y análisis de información	3
1.2 Campaña de medición	7
1.2.1 Medición de presiones en la red	9
1.2.2 Medición de caudales suministrados	9
1.2.3 Medición de variación de la demanda de agua en la red	10
1.2.4 Medición de errores de exactitud en macromedidores	11
1.2.5 Muestreo de consumos de cuota fija	11
1.2.6 Muestreo de errores de exactitud de micromedidores	13
1.2.7 Muestreo de ocurrencia de fugas	14
1.2.8 Levantamiento de cajas de válvulas	17
1.2.9 Levantamientos topográficos	19
1.2.10 Vinculación de tomas domiciliarias	19
1.2.11 Medición de parámetros eléctricos e hidráulicos en equipos de bombeo	21
Sección 2 Eficiencia física	34
2.1 Diagnóstico de eficiencia física	34
2.1.1 Hoja de cálculo, periodo de análisis y unidad de medida	36
2.1.2 Tarea 1 Cuantificación del suministro de agua	36
2.1.3 Tarea 2 Estimación de consumos medidos autorizados	38
2.1.4 Tarea 3 Estimación de consumos no-medidos autorizados	39
2.1.5 Tarea 4 Cálculo de pérdidas identificadas y eliminadas	40
2.1.6 Tarea 5 Estimación de pérdidas potenciales totales	43
2.1.7 Pérdidas reducibles y acciones	44
2.1.8 Beneficios de la reducción de fugas	45
2.1.9 Costo y tiempo de la reducción y control de fugas	46
2.2 Proyecto de eficiencia física	47
2.2.1 Elaboración de diagnóstico de la situación actual de fugas	48
2.2.2 Identificación de causas que originan el estado actual de fugas	48
2.2.3 Diseño de medidas preventivas y facilitadoras de la reducción y control de fugas	54
2.2.4 Definición de acciones para la eliminación intensiva de fugas para alcanzar un nivel aceptable	56
2.2.5 Diseño del programa permanente de control de fugas para mantener un nivel aceptable	61
2.2.6 Estimación de costos, calendarización y esquema de financiamiento	63

Sección 3 Eficiencia hidráulica	64
3.1 Diagnóstico de eficiencia hidráulica	64
3.1.1 Consumo unitario de los usuarios	64
3.1.2 Dotación	65
3.1.3 Continuidad del servicio de agua	65
3.1.4 Déficit entre el caudal de agua disponible en la red y el caudal de agua requerido por los usuarios	65
3.1.5 Presión media del agua en la red de distribución	66
3.1.6 Elaboración del diagnóstico de eficiencia hidráulica	66
3.2 Proyecto de eficiencia hidráulica	76
3.2.1 Conformación de sectores para redistribución de caudales y presiones en la red	77
3.2.2 Elaboración del modelo de simulación hidráulica de la red	78
3.2.3 Análisis hidráulico de la red sectorizada	81
3.2.4 Análisis hidráulico de las conducciones para entrega de agua en bloque	85
3.2.5 Estrategias para la puesta en marcha del proyecto de sectorización	87
Sección 4 Eficiencia energética	92
4.1 Diagnóstico de eficiencia energética	92
4.1.1 Metodología para elaborar un DEE	93
4.1.2 Diagnóstico energético de motores eléctricos	94
4.1.3 Diagnóstico de equipos de bombeo	98
4.1.4 Capacidad de sistemas de conducción	101
4.1.5 Análisis del suministro eléctrico	103
4.1.6 Aplicación de variadores de velocidad	105
4.1.7 Aspectos de mantenimiento en las instalaciones electromecánicas a observar en el DEE	105
4.2 Proyecto de eficiencia energética	106
4.2.1 Metodología para elaborar el proyecto de eficiencia energética (PEE) y determinación de medidas de ahorro	106
4.2.2 Medidas de optimización del consumo energético	109
4.2.3 Medidas que reducen el costo energético	122
4.2.4 Elaboración del reporte final del proyecto de eficiencia energética	123
4.2.5 Medidas de ahorro de energía complementarias	125
Sección 5 Proyectos de eficiencia integral	126
5.1 La evolución de los enfoques de eficiencia física, hidráulica y energética	126
5.2 Estructura del proyecto de eficiencia integral	128
5.2.1 Trabajos preliminares	129
5.2.2 Evaluación física y generación de datos básicos	130
5.2.3. Evaluación de la disponibilidad de agua	130
5.2.4 Desarrollo del proyecto de eficiencia hidráulica	130
5.2.5 Elaboración del proyecto de eficiencia energética	131
5.2.6 Cálculo de indicadores de evaluación	132
5.2.7 Puesta en marcha de los sectores hidráulicos y reducción de pérdidas de agua	132
5.3 Medidas de ahorro de energía resultantes de la optimización de la operación hidráulica	132
5.3.1 Operación fuera de hora punta de equipos de bombeo	133
5.3.2 Cambio de condiciones de carga y gasto en equipos existentes	136
5.3.3 Aplicación de velocidad variable en equipos que inyectan directo a la red	138

5.3.4 Paro definitivo de equipos como resultado de un programa de reducción de fugas	141
5.3.5 Cuantificación de ahorros de energía totales	142

Sección 6 Indicadores de eficiencia **144**

6.1 Indicador energético (IE)	145
6.2 Indicador de costo unitario de energía (CUE)	145
6.3 Indicador de eficiencia física (IEF)	145
6.4 Dotación promedio por habitante (D_p)	146
6.5 Indicador de continuidad en el servicio (ICS)	146

Anexos **147**

Anexo A Formatos para recopilación de información y datos	147
Anexo B Propiedades hidráulicas y medición	158
Anexo C Formato del balance de agua	160
Anexo D Estructura tarifaria	161
Anexo E Tablas y gráficas de referencia electromecánica	165
Anexo E.2 Cálculos eléctricos e hidráulicos	167

Bibliografía	175
--------------	-----

Presentación

La publicación del presente Manual forma parte de los documentos que desarrolla la Comisión Nacional del Agua, a través de la Gerencia de Fortalecimiento de Organismos Operadores de la Subdirección General de Agua Potable Drenaje y Saneamiento, con el fin de apoyar a los organismos operadores a nivel nacional en su desarrollo técnico y financiero tal y como lo establece entre sus estrategias el Programa Nacional Hídrico 2007-2012.

Este Manual es parte del Programa de Mejoramiento de Eficiencias desarrollado por la Comisión Nacional del Agua que tiene como fin contribuir al fortalecimiento de los organismos operadores mediante el incremento de la eficiencia operativa, la recaudación, el desarrollo de organismos operadores exitosos y la generalización del aprendizaje a otros organismos operadores que puedan aprovechar las experiencias. Asimismo, este Programa busca contribuir a la modernización del sector hidráulico, mediante la capacitación y la asistencia técnica al personal de los organismos operadores. Esto mediante la promoción de herramientas que permitan a los prestadores de los servicios hidráulicos identificar mejores prácticas para el incremento de su eficiencia que les ayude a contar con mayores recursos para la inversión en infraestructura y el desarrollo de tecnologías que les lleve a prestar un mejor servicio a la población.

En este contexto, el objetivo principal del presente Manual es proveer de material técnico y didáctico que contribuya al incremento y control de la eficiencia de los sistemas de agua potable y saneamiento de México, y proporcionar herramientas que permitan a los organismos operadores, entidades, empresas y profesionales afines, desarrollar proyectos que provoquen el ahorro de agua y de la energía eléctrica.

Definiciones y simbología

Las definiciones, términos y simbología que se exhibe enseguida tienen por objeto proporcionar una idea común entre los usuarios del Manual, de tal manera que todos manejen los mismos conceptos.

Definiciones

- Aforo.- Medición del caudal o gasto.
- Agua potable.- Líquido incoloro, insípido e inodoro que se puede encontrar en estado natural o ser producido a través de un proceso de purificación. Sirve para el consumo humano y animal.
- Bomba.- Máquina hidráulica que convierte la energía mecánica en energía de presión, transferida al agua.
- Caja de válvulas.- Es una estructura hidráulica complementaria donde se alojan cualquier tipo de válvulas, necesarias para la operación de una red de agua potable o de agua tratada.
- Cárcamo.- Es la estructura hidráulica complementaria del sistema hidráulico que sirve como almacenamiento provisional, para rebombar algún líquido de un nivel inferior a uno superior. Se emplea para el agua potable, agua tratada, drenaje sanitario y drenaje pluvial.
- Carga piezométrica.- Es la suma de la relación de la presión entre el peso específico del agua, más la elevación del conducto referenciada.
- Carga total de bombeo.- Es la suma algebraica de la carga de presión manométrica medida a la descarga, corregida con la altura a la línea de centros de la toma de señal de presión, el nivel dinámico, las pérdidas por fricción en las tuberías de conducción y la carga de velocidad.
- Carga de velocidad.- Es la energía cinética por unidad de peso del líquido en movimiento.
- Coeficiente de cortante.- Es el coeficiente de rozamiento del agua con las paredes de una tubería; depende del material con que esté construido o recubierto, del diámetro de la tubería y de la velocidad del agua; con este parámetro se calculan las pérdidas de energía en una conducción de agua.
- Consumo de agua.- Volumen de agua utilizado para cubrir las necesidades reales de los usuarios. Hay diferentes tipos de consumos los cuales son: doméstico y no-doméstico.
- Corriente eléctrica.- Es la intensidad de corriente que pasa a través de un conductor con resistencia R y cuya tensión eléctrica es V .
- Demanda.- Volumen total de agua requerido por una población en un periodo de tiempo, para satisfacer todos los tipos de consumo, incluyendo las pérdidas en el sistema.
- Distrito hidrométrico.- Sección que se aísla de la red, para realizar mediciones de consumo y hacer el balance de volúmenes de agua.
- Dotación.- Cantidad de agua potable asignada a cada habitante en un día medio anual, considerando su consumo, más la parte proporcional de los servicios comercial e industrial, y de las pérdidas físicas que existen en el sistema de distribución; su unidad es $l/hab/día$.
- Eficiencia del sistema de agua potable.- Capacidad de captar, conducir, regularizar, potabilizar y distribuir el agua, desde la fuente natural hasta los consumidores, con un servicio de calidad total.
- Error de exactitud.- Es el grado de aproximación que tiene una medición a un valor estándar o patrón.
- Factor de potencia.- Es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente y describe la relación entre la potencia convertida en trabajo útil y real y la potencia total consumida.
- Fuente de abastecimiento.- Sitio del cual se toma el agua para suministro en el sistema de distribución.
- Fugas.- Escape físico de agua en una red de tuberías de agua potable.
- Fugas latentes.- Fugas que permanecen en la red de distribución y que por su magnitud, no pueden ser detectadas y reparadas.
- Gasto, Caudal.- Volumen de agua medido en una unidad de tiempo; generalmente se expresa en litros por segundo.
- Gasto unitario.- Gasto requerido por una unidad.
- Gasto medio diario.- Es el gasto requerido para satisfacer las necesidades de una población en un día de consumo promedio.
- Gasto máximo diario.- Es el gasto requerido para satisfacer las necesidades de una población en el día de consumo promedio máximo anual.
- Gasto máximo horario.- Es el gasto requerido para satisfacer las necesidades de una población en el día y a la hora de máximo consumo promedio anual.
- Línea de conducción.- Elemento que sirve para trans-

portar el agua de un lugar a otro de forma continua, pudiendo funcionar a presión o a superficie libre.

- Nivel a centros de manómetro.- Es la distancia vertical entre el nivel de referencia y la posición del manómetro usado para medir las cargas de presión tanto en la succión como en la descarga.
- Nivel de referencia.- Es el nivel seleccionado como referencia para todas las mediciones hidráulicas, normalmente el plano inferior de la placa base de montaje del equipo de bombeo.
- Nivel de succión.- Es la distancia vertical desde el nivel de referencia hasta la superficie del agua cuando se encuentra en operación el equipo de bombeo.
- Pérdida de agua.- Volumen de agua que entra en el sistema de distribución de agua, que no es consumido, medido y facturado.
- Periodo de proyecto.- Tiempo para el cual se diseña el sistema. Es el periodo en que se estima que la obra o elemento del proyecto alcanza su máxima eficiencia. Depende de la situación financiera y de las características constructivas de la obra.
- Población de proyecto.- Es el número de habitantes de un fraccionamiento, o localidad, que hará uso de una obra hidráulica en el final del periodo de diseño.
- Potencia activa.- Es la potencia consumida por un motor eléctrico que se convierte en trabajo útil.
- Potencia aparente.- Es la suma de las potencias activa y reactiva o el producto de la corriente y la tensión eléctrica (voltaje).
- Potencia eléctrica.- Es la potencia de entrada en watts que requiere el motor eléctrico acoplado a la bomba y en operación normal.
- Potencia reactiva.- Es la potencia consumida por un motor eléctrico para generar el campo magnético necesario para su funcionamiento. En el triángulo de potencias formado por las 3 potencias mencionadas, el cateto opuesto es la potencia reactiva, el cateto adyacente es la potencia activa y la hipotenusa es la potencia aparente. El ángulo θ es el formado entre la potencia aparente y la potencia activa y el factor de potencia es el $\text{Cos}\theta$.
- Red de distribución.- Sistema de tubos que conduce el agua potable para el consumo de los usuarios.
- Sectorización.- Separación de la red de distribución en zonas aisladas físicamente entre ellas, con su propia fuente de suministro de agua.
- Tanque de regulación.- Depósito que tienen por obje-

to transformar un gasto, normalmente constante, a otro gasto variable según la demanda.

- Tensión eléctrica.- Diferencia de potencial medida entre dos puntos de un circuito.
- Toma domiciliaria.- Instalación hidráulica conectada a la red de agua potable, que sirve para entregar el agua a los usuarios dentro del predio.
- Válvula.- Dispositivo mecánico que se emplea para detener o controlar un flujo de agua en tuberías a presión.
- Vida útil.- Es el tiempo en el cual se estima que la obra o elemento del proyecto funciona adecuadamente.

Simbología

Los siguientes símbolos se utilizan en el Manual:

A	= Área (m^2 , cm^2)
A\$	= Ahorro económico anual que se obtendrá con la implementación del variador ($\$/\text{año}$)
AP _{ph} _p	= Potencia eléctrica a ahorrar en hora punta (kW)
C	= Consumo
C _d	= Consumo total doméstico diario (l/día)
C _{ECCF}	= Consumo de agua por error de cuota fija en el periodo del balance de agua (m^3)
Cap _o	= Capacidad requerida del capacitor
Cu	= Consumo unitario
Cu _{cf}	= Consumo unitario de cuota fija asignado (m^3/mes)
Cu _d	= Consumo unitario doméstico (l/hab/día)
Cu ^{global}	= Consumo unitario global ($\text{m}^3/\text{toma}/\text{mes}$)
Cu _{nd}	= Consumo unitario no-doméstico
Cu _t	= Consumo unitario de cada toma "i" de la muestra ($\text{m}^3/\text{toma}/\text{mes}$)
CP	= Caballos de potencia (H.P.)
CEP	= Es el costo unitario de la energía de punta según la región tarifaria
CUE	= Costo unitario de la energía ($\$/\text{kWh}$)
CVMD	= Coeficiente de variación máxima diaria
CVMH	= Coeficiente de variación máxima horaria
D _i	= Diámetro de tubería (m)
D _{r-m}	= Distancia del nivel de referencia a manómetro (m)
Def _{sar}	= Déficit promedio en el caudal de agua dis-

	ponible en la red y el caudal de agua requerido por los usuarios (\pm %)	H_b	= Carga hidráulica de bombeo (m)
		H_d	= Carga de presión en la descarga (m)
Dem	= Demanda	H_p	= Carga dinámica total para el sistema de bombeo propuesto a parar en hora punta (m)
Dem_{fa}	= Es la demanda facturable promedio actual	H_s	= Carga de presión de succión (m)
Dem_{pa}	= Es la demanda máxima en punta promedio	H_t	= Carga total (m)
Dem_{ia}	= Es la demanda máxima en intermedio promedio	H_v	= Carga de velocidad (m)
Dem_{ba}	= Es la demanda máxima en base promedio	h	= Pérdidas
Dem_{pia}	= Es la demanda máxima en punta e intermedio promedio	h_{cu}	= Pérdidas en el cobre a tensión nominal (kW)
Desb _v	= Desbalance de voltaje (volts)	h_{Fe}	= Pérdidas en el fierro a tensión nominal (kW)
Dot	= Dotación (l/hab/día)	h_f	= Pérdidas de carga hidráulica por cortante (m)
Dot _{req}	= Dotación actual requerida para satisfacer adecuadamente a los usuarios (l/hab/día)	h_{fc}	= Pérdidas de carga hidráulica por fricción en columna (m)
		h_{fs}	= Pérdidas de carga hidráulica por efecto del cortante más las pérdidas equivalentes por accesorios en la tubería de succión (m)
Err	= Error, Error de exactitud (%)	h_{fta}	= Pérdidas por cortante en la tubería actual (m)
Err _c	= Error esperado en la estimación del consumo unitario (m ³ /toma/mes)	h_{ftp}	= Pérdidas por cortante en la tubería propuesta (m)
Err _{cucf}	= Error de consumo unitario en cuota fija (\pm %)	h_{joule}	= Pérdidas por efecto joule (Watts)
Err _{fv}	= Error esperado en la estimación en cajas con fugas	h_v	= Pérdidas de carga de velocidad (m)
Err _{ft}	= Error esperado en la estimación de fugas en tomas	hr_{ri}	= Hora de registro de la lectura i
Err _m	= Error de exactitud del micromedidor (%)	$hr_{serv, i}$	= Horas de continuidad del servicio de agua potable de una zona de servicio de la red
Err _{mic}	= Error esperado en la estimación de error en micromedidores (%)	hr_{serv}	= Horas promedio de continuidad del servicio de agua de un sistema de agua potable
Err _q	= Error esperado en la estimación del caudal unitario de fugas en tomas domiciliarias (ml/s)	h_{tot}	= Pérdidas totales (kW)
Err _{qv}	= Error esperado en la estimación del caudal unitario de fugas en cajas de válvulas (ml/s)	I	= Corriente eléctrica (Amp)
		I_{cond}	= Corriente circulando en el conductor (Amp)
		I_{tt}	= Corriente eléctrica trifásica total (Amp)
		Long _c	= Longitud total del conductor (m)
EE _c	= Energía eléctrica consumida en el periodo de medición	Long _r	= Longitud total de las tuberías de la red de distribución (km)
EE _{pe}	= Energía consumida en punta esperada (kWh/año)	Long _t	= Suma de las longitudes de todas las tomas domiciliarias (km)
EE _{pa}	= Energía consumida en punta actual (kWh/año)	m	= Número total de captaciones en el sistema de agua potable
FC	= Factor de carga de operación del motor (adimensional)	mt	= Número total de tanques en el sistema de agua potable
FP	= Factor de potencia	Nr	= Nivel de referencia
g	= Aceleración de la gravedad (m/s ²)	ND	= Nivel dinámico (m)
H	= Carga (m)	ND _s	= Nivel dinámico de succión de la bomba (m)

n	= Número de revoluciones por minuto (rpm, RPM)	P_{ep}	= Potencia eléctrica del sistema de bombeo propuesto a parar en hora punta (kW)
n_c	= Número total de captaciones en el sistema de agua potable	P_h	= Potencia hidráulica (kW)
n_f	= Número de fugas reparadas	P_m	= Potencia mecánica (kW)
n_{hab}	= Número de habitantes servidos de la localidad	P_{mb}	= Potencia mecánica absorbida por la bomba (HP)
n_p	= Número de puntos de medición de presión	P_n	= Potencia nominal del transformador en evaluación (kVA)
n_{serv}	= Número de habitantes servidos en el sistema de agua potable	P_r	= Potencia reactiva medida (kVar)
n_t	= Número total de tomas domiciliarias registradas	P_s	= Potencia de salida de la bomba (kW)
n_{tanq}	= Número total de tanques en el sistema de agua potable	P_{rt}	= Potencia real considerando todas las cargas alimentadas por el transformador (kW)
n_z	= Número total de zonas de servicio de agua potable en una red	P_{transf}	= Potencia eléctrica que demanda el transformador actualmente (kW)
na	= Tamaño de la muestra de usuarios con registros históricos en su micromedidor	Per_{bal}	= Periodo de análisis del balance (días)
na_c	= Tamaño de la muestra para evaluar consumos unitarios	Per_{ri}	= Periodo de recuperación de la inversión (años)
na_{mic}	= Tamaño de muestra para evaluar error de exactitud en micromedidores	$\%_{ft}$	= Porcentaje de ocurrencia de fugas en tomas domiciliarias, preestimado (%)
p	= Presión (kg/cm ²)	$\%_{fugas}$	= Porcentaje de fugas potenciales en el sistema de distribución (%)
p_d	= Presión de operación en la descarga (kg/cm ²)	$\%_{fv}$	= Porcentaje preestimado de ocurrencia de fugas en cajas de válvulas (%)
p_j	= Presión en el jésimo punto de medición en campo (kg/cm ²)	$\%_{mic}$	= Porcentaje preestimado de micromedidores que tienen un error de exactitud fuera del límite máximo admisible (± 2 %)
p_{mr}	= Presión media del agua en la red de distribución (kg/cm ²)	$\%_{z,i}$	= Porcentaje de cobertura de red o tomas domiciliarias de una zona de servicio de la red (%)
p_{med}	= Presión media en la red de distribución (m.c.a.)	Q	= Caudal, Flujo ó Gasto (l/s, m ³ /s)
p_{op}	= Presión óptima de operación (kg/cm ²)	Q_{al}	= Caudal unitario de fuga (l/s)
p_r	= Presión registrada en el monitoreo (kg/cm ²)	Q_{bomba}	= Gasto de la bomba (m ³ /s)
p_s	= Presión de operación en la succión (kg/cm ²)	Q_f	= Caudal promedio de fugas (mm/l/s)
P	= Potencia (kW)	Q_m	= Caudal medio registrado en el equipo portátil (l/s)
P_a	= Potencia activa (kW)	Q_{med}	= Gasto medido (l/s)
P_{act}	= Potencia activa medida (kW)	$Q_{medidor}$	= Gasto instantáneo registrado en el macro-medidor instalado (l/s)
P_e	= Potencia eléctrica (kW)	Q_{medreq}	= Gasto medio requerido actual (l/s)
P_{edm}	= Potencia eléctrica demandada por el motor (kW)	Q_p	= Gasto especificado para el sistema de bombeo propuesto a parar en hora punta (m ³ /s)
P_{emb}	= Potencia eléctrica que demanda el conjunto motor-bomba actualmente (kW)	$Q_{patrón}$	= Gasto instantáneo registrado en el medidor portátil (l/s)
P_{ei}	= Potencia eléctrica registrado en la lectura i	Q_{req}	= Gasto requerido (l/s)

$Q_{req,i}$	= Caudal requerido por los usuarios en una zona de servicio, i (l/s)	Vol_{eprp}	= Volumen estimado de pérdidas reales potenciales (m ³)
$Q_{s,i}$	= Caudal de agua suministrado a la red de una zona de servicio, i (l/s)	Vol_{estap}	= Volumen estimado total de agua producida (m ³ /año)
$Q_{t s}$	= Caudal total suministrado a toda la red de distribución (l/s)	Vol_{fat}	= Volumen actual de fugas potencial total (m ³)
Q_v, q_v	= Flujo volumétrico (m ³ /s)	Vol_{fcv}	= Volumen de fugas en cajas de válvulas (m ³)
R	= Resistencia	Vol_{fp}	= Volumen de consumo de agua ajustado para el final del periodo (m ³)
R_c	= Resistencia del conductor (Ω)	Vol_{fpl}	= Volumen de fugas que permanecerán latentes (m ³)
R_u	= Resistencia real del conductor (Ω/m)	Vol_{fr}	= Volumen de fugas reparadas (m ³)
S	= Desviación estándar	$Vol_{fr20\%}$	= Volumen de fugas reducibles al 20% (m ³)
S_c	= Desviación estándar del consumo unitario histórico en usuarios con micromedidor (m ³ /toma/mes)	Vol_{ft}	= Volumen final en el tanque j (m ³)
S_{qi}	= Desviación estándar del gasto de fuga en tomas domiciliarias (ml/s)	Vol_{ftd}	= Volumen de fugas en tomas domiciliarias (m ³)
S_{qv}	= Desviación estándar del gasto de fuga en cajas de válvulas (ml/s)	Vol_{if}	= Volumen de fugas en el sistema (m ³)
t	= Tiempo de operación del sistema (días)	Vol_{ip}	= Volumen de consumo de agua ajustado para el inicio del periodo (m ³)
t_f	= Tiempo promedio de permanencia de las fugas, desde el inicio del periodo del balance de agua hasta ser reparada (días)	Vol_{it}	= Volumen inicial en el tanque j (m ³)
t_{OA}	= Tiempo de operación anual de la captación (h/año)	Vol_{map}	= Volumen de consumo de agua contabilizado en el mes anterior al periodo (m ³)
UMF	= Umbral mínimo de fugas (referencia óptima) (m ³ /toma/día)	Vol_{masc}	= Volumen consumido medido total autorizado sin corregir (m ³)
V	= Tensión eléctrica trifásica (volts)	Vol_{micr}	= Volumen de agua registrado por el micromedidor (l)
V_{an}	= Tensión de la fase A (volts)	$Vol_{Patrón}$	= Volumen registrado en un recipiente certificado (l)
V_{bn}	= Tensión de la fase B (volts)	$Vol_{peridel}$	= Volumen de pérdidas totales identificadas y eliminadas (m ³)
V_{cn}	= Tensión de la fase C (volts)	Vol_{perftd}	= Volumen de agua perdido por fugas en tomas domiciliarias (l)
V_{prom}	= Tensión promedio entre fases (volts)	Vol_{pft}	= Volumen de agua perdido por fugas en tuberías principales y secundarias (m ³)
VIF	= Indicador del volumen de fugas (m ³ /toma/día)	Vol_{sc}	= Volumen suministrado al sistema en un año corregido (m ³)
Vol_A	= Volumen de ajuste por almacenamiento (m ³)	$Vol_{suministrado}$	= Volumen de agua suministrada a la red (m ³)
Vol_{ajtot}	= Volumen de consumo de agua ajustado total (m ³)	$Vol_{sumacorr}$	= Volumen de suministro total de agua corregido (m ³)
$Vol_{consumido}$	= Volumen de agua consumida, medida o no que reciben los usuarios en sus tomas (m ³)	Vol_{nma}	= Volumen consumido total no medido autorizado (m ³)
Vol_{epp}	= Volumen estimado de pérdidas potenciales totales (m ³)	Vol_{ucf}	= Volumen consumo de agua usuarios con cuota fija en el periodo del balance de agua sin corregir (m ³)
		Vol_{ump}	= Volumen de consumo de agua contabilizado en el último mes del periodo (m ³)

Z_c = Valor de la abscisa de la curva de probabilidad normal estandarizada (1.96 para nivel de confianza del 95%)

Δ = Incremento o disminución

ρ = Densidad del agua bombeada (kg/m^3)

η_b = Eficiencia de la bomba (%)

η_{em} = Eficiencia electromecánica del conjunto motor – bomba (%)

η_{fis} = Eficiencia física (%)

η_m = Eficiencia del motor (%)

η_p = Eficiencia electromecánica para el sistema de bombeo propuesto a parar en hora punta (%)

η_{trans} = Eficiencia del transformador (%)

Introducción

La eficiencia de un sistema de abastecimiento de agua potable a ciudades se asocia con el proceso de captar, conducir, regularizar, potabilizar y distribuir el agua, desde la fuente natural hasta los consumidores, con un servicio de calidad total. En este contexto de la eficiencia se identifican tres escenarios: a) El de la ingeniería del sistema de abastecimiento, b) El de la comercialización de los servicios de agua potable, y c) El del desarrollo institucional del organismo operador (Ochoa, 2005).¹

Desde esta perspectiva, un sistema hidráulico para el abastecimiento de agua potable deja de ser eficiente cuando comienza a utilizar excesivos recursos humanos, materiales y económicos dentro de estos tres escenarios, para prestar el servicio de calidad a los usuarios de una población.

En las actividades del escenario del desarrollo institucional del organismo operador de agua potable se desatienden las eficiencias en la autonomía organizativa, el liderazgo de su personal directivo, la administración del

personal, la orientación financiera, los esquemas orientados hacia el consumidor, la capacidad técnica del personal, la capacitación del personal y la interacción con instituciones externas. El resultado de esta desatención son el resquebrajamiento financiero e institucional del organismo operador, bajos niveles de preparación técnica del personal, desorden en la administración gerencial, excesivo número de empleados, entre otros.

En el caso de las actividades del escenario de comercialización del servicio, se desatienden las eficiencias de las áreas de facturación, cobranza, contabilidad, padrón de usuarios, estimación de consumos, tarifas, control de suministros, comunicación social y comunicación y transporte. Derivado de esta desatención, surgen los problemas de usos clandestinos, baja cobertura de micromedición, usos mal clasificados e identificados, cartera vencida importante, esquemas tarifarios lejos de la realidad, altos consumos de materiales y equipos, y una comunicación con el usuario deteriorada impactando en baja cultura del agua de la sociedad.



¹ Ochoa L., 2005, "Planeación de acciones de incremento y control de la eficiencia en sistemas de agua potable", Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial, CONAGUA, México.

Por último, en las actividades del escenario de ingeniería de producción y distribución, se descuidan las eficiencias de la condición hidráulica del sistema, de la hermeticidad de la red e infraestructura, de los sistemas de bombeo e instalaciones electromecánicas, y de la calidad del agua que se proporciona. Los descuidos de estas actividades de ingeniería ocasionan servicios discontinuos del agua a los usuarios (tandeos), entrega de agua a los consumidores con bajas presiones, niveles de fugas de agua que llegan a alcanzar hasta el 50% del volumen suministrado, agua no potable en las tomas domiciliarias, y excesivos consumos de energía en los equipos de bombeo con implicaciones económicas hasta del 35% de los ingresos del organismo operador.

Estos tres escenarios mencionados reflejan la complejidad que afronta un organismo operador para mantenerse en un nivel de eficiencia aceptable, por lo que desde hace varios años se han derivado programas federales de inversión, para atender el problema de la eficiencia de sistemas de agua potable. Entre ellos se encuentra el denominado Programa de Asistencia Técnica para la Mejora de la Eficiencia del Sector de Agua Potable y Saneamiento (PATME), dentro del cual se ha enmarcado la elaboración del presente Manual.

Este Manual aborda la eficiencia en el escenario de ingeniería de producción y distribución, en particular las eficiencias física, hidráulica y energética, desde la perspectiva que prevalece actualmente en los sistemas hidráulicos de agua potable del país y considerando que las aplicaciones y acciones proyectadas tienen la esencia siguiente:

- Están basadas en información y datos disponibles, generando un mínimo de datos complementarios.
- Aprovechan al máximo la infraestructura existente.
- Arrojan soluciones prácticas, económicas y de implantación en el corto plazo.
- Los resultados garantizan una mejor calidad del servicio de agua a los usuarios (tendencia a obtener cero tandeos).
- Fomentan el ahorro de agua y energía para el organismo operador.

La razón principal del presente Manual es transferir los procedimientos clave para elaborar proyectos de eficiencia a los técnicos involucrados en tareas afines, con el fin de que puedan replicarlos en cualquier población de México.

Con la intención de facilitar su comprensión, el Manual se ha estructurado en seis secciones, un apéndice y varios anexos.

La primera sección trata sobre la información a recopilar en el sistema de agua potable y el organismo operador, para elaborar un diagnóstico y proyecto de eficiencia. También, se muestran los métodos de medición en campo que son necesarios para completar los datos básicos.

En la segunda sección del Manual se presentan los procesos que deben tomarse en cuenta para realizar un proyecto de eficiencia física del sistema de abastecimiento de agua potable, orientado por un lado, a eliminar las fugas de agua y, por otro, a controlar el nivel de fugas alcanzado.

En la sección tres se describen los elementos necesarios para realizar un proyecto de eficiencia hidráulica de la red de distribución de agua potable. Específicamente, se promueve la redistribución de caudales y presiones en la red, con base en un esquema de sectorización, apoyando su diseño en un modelo de simulación hidráulica, que contenga a detalle todos los tramos de tuberías, válvulas, tanques, rebombes, pozos y tanques de regulación.

El proyecto de eficiencia energética se expone en la sección cuatro, donde se incluyen acciones del lado del suministro, con la intención de que se obtengan ahorros de energía en forma inmediata, utilizando equipos de alta eficiencia, adecuación de tarifas, aumento del factor de potencia y administración de la demanda en hora punta.

En la sección cinco se muestra una propuesta para incrementar en forma integral la eficiencia física, hidráulica y energética, con el fin de multiplicar los ahorros de agua y energía en un sistema de agua potable. Se aborda en forma conjunta los métodos para implementar acciones de ahorro de energía del lado del suministro y demanda, planteada para aplicarse en el mediano plazo en combinación con el incremento de las eficiencias física e hidráulica del sistema de agua potable.

En la sección seis se muestran los principales indicadores de evaluación que se recomienda aplicar para determinar la eficiencia de los sistemas de agua potable en el escenario de la ingeniería de producción y distribución.

Finalmente, se incluye una serie de anexos, cuya intención es proporcionar ayuda adicional para fortalecer los procedimientos del Manual.

Sección 1 Generación de datos básicos

La generación de datos básicos se realiza de dos maneras:

a) Recopilando y analizando la información del organismo operador y, b) Mediante una campaña de medición.

1.1 Recopilación y análisis de información

La información que se recopila en el organismo operador se muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1.A Información general a recopilar del organismo operador

Área	Fuente de información	Información a recopilar	Observaciones
General	Padrón de usuarios	Número de tomas domiciliarias	Clasificadas por tipo de uso, con y sin medidor
		Número de tomas por colonia	Domésticas y No-domésticas
		Número de tomas por clase socioeconómica	Clase popular, media y residencial
		Número de tomas por ruta de lectura	Domésticas y No-domésticas
	Relación y estudios de factibilidades	Cobertura de la red y del servicio	En porcentaje de área y de habitantes
		Zonas de crecimiento de población	Colonias o fraccionamientos en proceso, con número de tomas
	Oficinas gubernamentales	Clima	Temperatura media anual, máxima, mínima; precipitación media anual
		Índice de hacinamiento	Número de personas por vivienda o toma domiciliaria doméstica
		Población histórica	De los últimos tres censos y conteos nacionales
		Planos de traza de calles, colonias y nombres	Georeferenciado, con escala real e imagen satelital

Tabla 1.1.B Información a recopilar del área técnica del organismo operador

Área	Fuente de información	Información a recopilar	Observaciones
Técnica	Estadísticas de producción	Volúmenes suministrados al sistema	Resumen mensual, mínimo un año histórico
		Caudales producidos en las captaciones	Medios anuales, máximos diarios y máximos horarios, para época de verano e invierno en climas extremosos
		Características de los macromedidores instalados en puntos de suministro	Tipo, modelo, fecha de instalación y calibración, diámetro
	Archivos digitales y mapotecas	Planos de la red de agua potable	A escala real, georeferenciados, con diámetros, materiales, rugosidades y longitudes de tuberías, cotas topográficas en cruceros y tipos, ubicación de pozos, rebombes y tanques, válvulas; preferentemente en formato AutoCad o ArcView
		Planos de perfiles de conducciones	Con indicaciones de cambio de diámetro y material; ubicación de válvulas de aire y desfogue

Tabla 1.1.B Información a recopilar del área técnica del organismo operador

Área	Fuente de información	Información a recopilar	Observaciones
Técnica	Archivos digitales y mapotecas	Planos de topografía	En planta con curvas de nivel a cada 0.5 metros en terreno muy accidentado y a cada 2 metros en superficies planas; preferentemente en formato AutoCad o ArcView
		Proyectos ejecutivos anteriores	Se pueden obtener datos adicionales de planos y mediciones
		Planos de lotificación y predios	Preferentemente en formato AutoCad o ArcView
		Croquis de detalle de fontanería	De rebombes, tren de descarga de pozos, tanques de regulación; con simbología oficial CONAGUA
	Estadísticas de mantenimiento	Ocurrencia histórica de fugas	Fugas registradas en un año histórico, ocurridas en tomas domiciliarias, tuberías, red y válvulas; reportadas y reparadas mensualmente, tipos de falla, caudales unitarios vs presión, y tiempos de reparación

Tabla 1.1.C Información a recopilar del área comercial del organismo operador

Área	Fuente de información	Información a recopilar	Observaciones
Comercial	Facturación	Consumos de agua por tipo de usuario	Volúmenes mensuales históricos de un año, por tipo de usuario, por colonia o rutas de lectura, para cuota fija y servicio medido
		Políticas de facturación y cobro	Usuarios exentos de pago, usos públicos, escuelas, hoteles y usuarios con cuota fija, usos irregulares y clandestinos
	Estadísticas de Mantenimiento	Características de micromedidores	Tipos y modelos de aparatos, coberturas geográficas, errores históricos de exactitud, ocurrencia y tiempo de sustitución

Tabla 1.1.D Información a recopilar del área operativa del organismo operador

Área	Fuente de información	Información a recopilar	Observaciones
Operativa (energética)	Facturación de energía eléctrica	Datos generales del suministro eléctrico	Nombre de la compañía eléctrica que proporciona el servicio, tensión, tarifa por equipo de bombeo, historial mensual de facturación en un año (demanda máxima, consumo de kilowatts hora, factor de potencia), horarios de operación
	Planos, inventario de equipos y recorrido de campo	Infraestructura eléctrica	Diagrama unifilar (calibre, protecciones, transformadores, motores, capacitores y generadores); acometida (tipo, elemento desconectador, apartarrayos, fusibles); subestación eléctrica (tipo, número de transformadores, sistema de tierras); transformadores (identificación, tipo, capacidad nominal, relación de transformación, antigüedad); capacitores (ubicación, capacidad, tipo de banco, elemento desconectador, estado); arrancador (tipo, capacidad); conductores eléctricos (número de hilos, longitud, calibre, material, tipo de aislamiento); motor eléctrico (marca, tipo, capacidad, tensión de suministro, corriente nominal, número de polos, velocidad a plena carga, factor de servicio, eficiencia nominal, antigüedad, número de rebobinados, temperatura)
		Infraestructura mecánico-hidráulica	Bombas (identificación, marca, tipo, modelo, material de carcasa, material del impulsor, caudal de diseño, carga de diseño, eficiencia de diseño); succión (nivel dinámico en acuífero y cárcamo); características del tren de descarga, historial de niveles dinámicos en un año; características de la operación; condiciones de succión y descarga; destino del fluido bombeado y operación
	Mantenimiento	Bitácoras de mantenimiento Programas institucionales	Registro histórico y reciente de actividades, reparaciones a motores y bombas, registro de monitoreo de variables

Tabla 1.1.E Información a recopilar del área institucional del organismo operador

Área	Fuente de información	Información por recopilar	Observaciones
Institucional	Informes ejecutivos	Indicadores de gestión	Indicadores de eficiencia física, hidráulica y energética, evolución histórica en un año, impactos, beneficios y costos
		Planes maestros y de factibilidad	Programas proyectados, inversiones a corto y largo plazo, proyectos de eficiencia en desarrollo, metas anualizadas
		Organigrama de la institución	Describir funciones, personal e interrelación con otras áreas
		Programas interinstitucionales	Programas de eficiencia que se están ejecutando con recursos aportados por CONAGUA, entidades estatales y municipales

Es conveniente que la información se encuentre actualizada y de preferencia en formato digital. Se recomienda verificar su grado de confiabilidad y efectuar recorridos de campo para cotejarla y ratificarla. También es conveniente recurrir a bases de datos alternas, tales como el sistema satelital “Google Earth” y otras fuentes de internet y la información que proporcionan entidades federales, estatales y municipales, tales como la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Instituto de Estadística, Geografía e Informática (INEGI),

Comisiones Estatales de Agua, etc. En el anexo A del presente Manual se presentan varios formatos para facilitar la recopilación de información.

1.2 Campaña de medición

La campaña de medición está dividida en la recopilación de datos hidráulicos y en trabajos electromecánicos en equipos de bombeo, como se muestra en la tabla 1. 2.

Tabla 1.2 Descripción de la campaña de medición

Campaña de medición	Actividad	Objetivo	Equipo y herramientas
Hidráulica	Medición de presiones en la red	Ajustar el modelo de simulación hidráulica de la red y definir zonas críticas de alta y baja presión	Manómetro portátil tipo Bourdon, con conexión para toma domiciliaria
	Medición de caudales suministrados	Efectuar balances de agua y volumétrico, y ajustar modelo de simulación hidráulica	Medidor ultrasónico o electromagnético portátil
	Medición de variación de la demanda de agua en la red	Obtener curva típica de variación de la demanda y coeficientes de variación horaria	Medidor ultrasónico o electromagnético portátil con “data-logger”
	Medición de errores de exactitud en macromedidores	Corregir los datos de volúmenes producidos y suministrados	Medidor ultrasónico o electromagnético certificado
	Muestreo de consumos de cuota fija	Estimar volumen unitario de consumo mensual y ajustar balance de agua y dotaciones	Formatos de campo

Campaña de medición	Actividad	Objetivo	Equipo y herramientas
Hidráulica	Muestreo de errores de exactitud de micromedidores	Ajustar volumen medido facturado en el balance de agua y estimar el estado de exactitud de micromedidores	Bote de 20 litros certificado
	Muestreo de ocurrencia de fugas	Estimar el caudal unitario de fugas, zonas y porcentajes de ocurrencia y tipos de fallas, para el balance de agua y el programa de control de fugas	Formatos de campo, bote calibrado y cronómetro
	Levantamiento de cajas de válvulas	Detallar planos de la red, evaluar el estado de las cajas y detectar fugas	Herramientas para destapar cajas y formatos de campo
	Levantamientos topográficos	Determinar cotas de cruceros de la red y perfiles de líneas de conducción	Estación total, niveles, sistema de posicionamiento global (GPS), software AutoCad
	Vinculación de tomas domiciliarias	Actualizar padrón de usuarios y verificar usos del agua	Formatos de campo, Sistema de Información Geográfico (SIG)
Electromecánica en equipos de bombeo	Medición de parámetros eléctricos	Determinar potencia de operación y calcular eficiencia	Analizador de potencia de redes eléctricas o equipos de medición (Voltímetro, Amperímetro, etc.)
	Medición de caudal de descarga en bombas	Determinar el caudal de operación del equipo	Medidor de gasto ultrasónico o electromagnético
	Medición de presiones en descarga y succión	Obtener carga de operación del equipo	Manómetro portátil tipo Bourdon
	Definición de niveles de referencia en bombeos	Obtener carga de operación y pérdidas de carga hidráulica	Sonda eléctrica, cinta métrica, etc.

Enseguida se detallan algunas recomendaciones importantes para efectuar las mediciones, obtener mejores

resultados en el registro de datos, y evitar costos y tiempos excesivos.

1.2.1 Medición de presiones en la red

La medición de presiones se realiza con un manómetro comercial tipo Bourdon conectado en las tomas domiciliarias del sistema de distribución (ver figura 1.1).

Figura 1.1 Medición de presiones en la red



No existe una base teórica específica para determinar el número de puntos de medición de presiones en la red, puesto que depende de la extensión de la ciudad. Sin embargo, con base en la experiencia y con el fin de tener una cobertura adecuada de medición para los fines de un buen diagnóstico y ajuste del modelo de simulación hidráulica del sistema de abastecimiento de agua, se recomienda realizar del orden de un punto de medición de presión por cada 270 tomas domiciliarias registradas.

La ubicación de los puntos de medición de presiones se establece dibujando el plano de la red en ejes cartesianos y situando las coordenadas de cada punto de medición mediante números aleatorios simples en ambos ejes.

Por cuestiones prácticas y de seguridad, la medición de presiones se realiza durante el día, que es la condición de presiones bajas en la red. Por lo tanto, para efectos de ajuste del modelo de simulación hidráulica e interpretación de ocurrencia de fugas, es conveniente anotar la hora y el día en que es realizada la medición de presión en cada punto. De cualquier manera, de acuerdo a las

posibilidades, debe considerarse la factibilidad de realizar mediciones de presión en horarios nocturnos.

Con respecto a los manómetros, será necesario adquirir aparatos que tengan las escalas apropiadas a las presiones esperadas de la red.

1.2.2 Medición de caudales suministrados

La medición de caudales se realiza en cada una de las captaciones productoras de agua para la red tales como pozos, manantiales, presas, galerías filtrantes, etc. Esta debe realizarse exactamente en la tubería donde ingresa el agua a la red de distribución. Asimismo, en los casos de potabilizadoras, tanques o rebombes, interesa medir el caudal justo a la salida de estas estructuras.

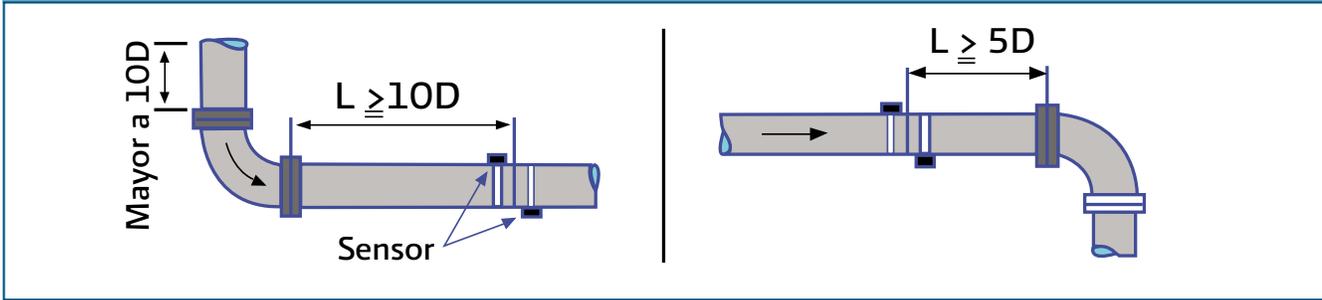
Se recomienda aprovechar los macromedidores instalados en el sistema de agua potable, siempre y cuando se obtengan previamente los errores de exactitud de estos equipos como se indica en las pruebas de la sección 1.2.4 de este Manual.

Cuando no exista macromedidor en la captación, se recomienda utilizar un medidor portátil del tipo ultrasónico o electromagnético, por la alta exactitud que ofrecen y la versatilidad en su uso. Este medidor debe estar certificado por un laboratorio de pruebas acreditado.

La posición del medidor en la tubería de prueba debe ser en tramos rectos y preferentemente horizontales, asegurándose de que antes y después del medidor, no existan obstáculos tales como codos, válvulas, reducciones, ampliaciones, bombas, etc., que distorsionen el perfil de velocidades del agua en la sección de prueba. Normalmente se debe dejar una distancia equivalente a 10 diámetros aguas arriba y 5 diámetros aguas abajo del eje del medidor (ver figura 1.2). Sin embargo, actualmente hay en el mercado medidores que pueden reducir estas distancias, las cuales se pueden consultar en los respectivos catálogos del fabricante.

Se podrá instalar el medidor en un conducto inclinado o vertical siempre y cuando lo permita el fabricante en sus limitaciones de exactitud y cuando se asegure que la tubería de pruebas esté completamente llena en toda su sección. También, para garantizar la medición adecuada, deberá evitarse colocar el medidor en aquellos tramos donde existan burbujas de aire o sólidos en suspensión.

Figura 1.2 Posición del medidor de caudal



La medición de caudal suministrado se efectúa en intervalos cortos, del orden de 15 a 30 minutos. Si no se detectan variaciones de caudal de +/- 5% en el transcurso de un día, se considerará el valor registrado como el valor de gasto medio suministrado a la red por esta captación. En caso de que la fluctuación de caudal sea mayor a este porcentaje, se deberán practicar pruebas continuas al menos durante 24 horas, con el fin de obtener un valor promedio de suministro de agua en ese punto; estas pruebas se realizarán según lo indicado en la sección 1.2.3 de este Manual.

1.2.3 Medición de variación de la demanda de agua en la red

Para realizar la prueba de medición de variación de la demanda de agua en la red, se utilizará el macromedidor instalado o bien un medidor portátil, de acuerdo con las especificaciones y recomendaciones señaladas en la sección 1.2.2 de este Manual. La prueba tendrá una

duración de 24 horas continuas, registrando el valor del caudal instantáneo en intervalos de 5 a 15 minutos, dependiendo del equipo.

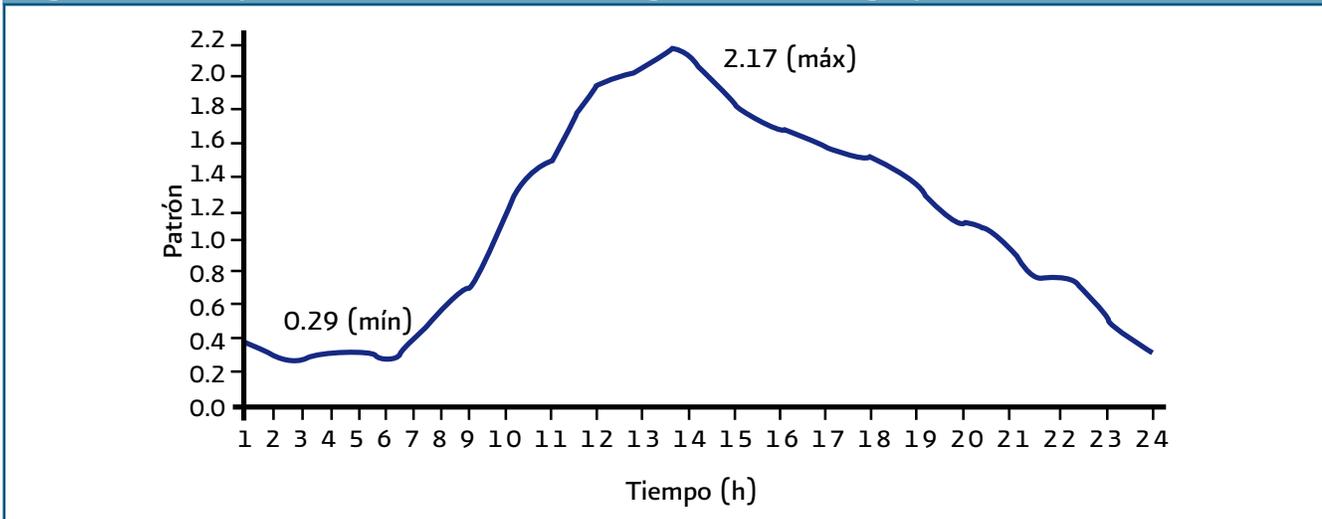
Se utilizará de preferencia un medidor que tenga "Data-Logger" integrado, para evitar al máximo el error en la toma de lecturas y facilitar el procesamiento de datos.

Con los datos registrados se elaborará la curva típica de demanda de agua de los usuarios, que como ejemplo se muestra en la gráfica de la figura 1.3.

En la gráfica, el eje de las ordenadas está dado en porciento del caudal medio suministrado (valor de 1.0), el cual se obtiene sumando los valores de caudal instantáneo, entre el número de valores registrados.

En la curva de variación de la demanda de agua medida en campo, se identifica el valor máximo como el Coeficiente de Variación Horaria (valor de 2.17) y el valor mínimo como el Índice Mínimo Nocturno (valor de 0.29) de la zona de influencia de la captación donde se realizó la medición continua.

Figura 1.3 Curva típica de variación de la demanda de agua en una red de agua potable



1.2.4 Medición de errores de exactitud en macromedidores

En cada uno de los macromedidores instalados en las obras de abastecimiento se debe descubrir y corregir cualquier error de medición. La prueba de error de exactitud en macromedidores se apoya en los procedimientos señalados en la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCFI-1994 y puede realizarse con cualquiera de los siguientes procedimientos:

- Comparación de registros con un medidor portátil calibrado.
- Prueba del medidor en un banco.
- Comparación de registros con un segundo medidor calibrado e instalado en serie.
- Sustitución del equipo por otro calibrado y comparación de registros.

El método más rápido, práctico y económico es el de comparación de registros con un medidor portátil calibrado (ver figura 1.4). El punto exacto de colocación del equipo de medición portátil en la tubería de prueba deberá ajustarse a las especificaciones técnicas indicadas en la sección 1.2.2 de este Manual.

Figura 1.4 Medición de error de exactitud en macromedidor instalado (color azul), con medidor portátil electromagnético de inserción



La evaluación del error de exactitud (Err) se efectúa con la ecuación 1.1.

$$\text{Err} = \frac{(Q_{\text{medidor}} - Q_{\text{patrón}})}{Q_{\text{patrón}}} \times 100 \quad (1.1)$$

Donde:

Err = Error de exactitud (%)

Q_{medidor} = Gasto instantáneo registrado en el macromedidor instalado (l/s)

$Q_{\text{patrón}}$ = Gasto instantáneo registrado en el medidor portátil (l/s)

La solución de esta ecuación arroja un valor en porcentaje negativo si el macromedidor instalado está midiendo de menos (submedición), por el contrario un valor positivo indica que el macromedidor está midiendo de más (sobremedición). Por ejemplo, si el macromedidor instalado está registrando 100 l/s y el porcentaje medido y calculado resulta de -4.5%, quiere decir que el valor correcto de caudal es de 104.71 l/s, en cambio si resulta un error de +6.7%, entonces el valor correcto será de 93.72 l/s.

1.2.5 Muestreo de consumos de cuota fija

Con la medición de consumos de cuota fija se determina si existe una asignación errada por parte del organismo operador en el volumen de consumo mensual de los usuarios que no tienen micromedidor (cuotas fijas). La prueba se realiza de tres maneras:

- Muestreo de consumos históricos de facturación en tomas con micromedidor.
- Muestreo de registros de consumos en campo en micromedidores existentes.
- Muestreo de registros de campo en micromedidores nuevos calibrados.

Este último muestreo es el más confiable de los tres, pero es el más costoso y el que tarda más tiempo en realizarse. No obstante, los otros dos dan buenas aproximaciones para efectos de evaluación y diagnóstico.

1.2.5.1 Muestreo de consumos históricos de facturación en tomas con micromedidor

Del total de registros históricos de la facturación del organismo operador, se selecciona una muestra aleatoria de tomas domiciliarias que cuenten con micromedidor funcionando. Los consumos registrados de cada toma elegida en un periodo de un año, se suman y se divide el resultado entre el número de datos del registro para obtener el consumo unitario promedio mensual

(m³/toma/mes). El consumo unitario global se obtiene con el promedio de todos los consumos unitarios de las tomas seleccionadas en la muestra, ver ecuación 1.2.

$$Cu_{\text{global}} = \frac{\sum_{i=1}^{na} Cu_i}{na} \quad (1.2)$$

Donde:

Cu_{global} = Consumo unitario global (m³/toma/mes)

Cu_i = Consumo unitario de cada toma "i" de la muestra (m³/toma/mes)

na = Tamaño de la muestra

Se recomienda obtener una muestra de consumos por cada tipo de usuario para obtener una mejor aproximación de la prueba. En el caso de usuarios domésticos se prefiere una clasificación por clase socioeconómica (residencial, media, popular).

Es necesario corregir los valores de consumos históricos registrados con el error de exactitud promedio de los micromedidores, el cual se obtiene en campo como se indica en la sección 1.2.6 de este Manual.

Para obtener el tamaño de la muestra, se clasifica el universo de usuarios con micromedidor funcionando de acuerdo al tipo de usuario (doméstico, comercial, industrial, etc.). El total de usuarios de la muestra por cada tipo de usuario, se calcula entonces con la fórmula 1.3.

$$na = \left[\frac{Z_c^2}{\text{Err}_c^2} \right] S_c^2 \quad (1.3)$$

Donde:

na = Tamaño de la muestra de usuarios con registros históricos en su micromedidor

Z_c = Valor de la abscisa de la curva de probabilidad normal estandarizada (1.96 para nivel de confianza del 95%)

Err_c = Error esperado en la estimación del consumo unitario (m³/toma/mes)

S_c = Desviación estándar del consumo unitario histórico en usuarios con micromedidor (m³/toma/mes)

Se recomienda utilizar un error de estimación del orden del 5% sobre el promedio del consumo unitario por toma mensual. La desviación estándar se determina a partir de los consumos en un mes de usuarios con medición.

Por ejemplo, para un padrón de usuarios con micromedición funcionando de 78 347 tomas, con consumo doméstico promedio mensual igual a 32.64 m³/toma/mes, con una desviación estándar de 16.74 m³/toma/mes, y con un error de estimación (EE_c) de: 0.05 * 32.64 = 1.632 m³/toma/mes, se obtiene un tamaño de muestra de:

$$na = \left(\frac{1.96^2}{1.632^2} \right) * 16.74^2 = 405 \text{ tomas}$$

Lo que quiere decir entonces, que se deberán elegir 405 contratos del padrón de usuarios para realizar el análisis respectivo. Es importante mencionar que la selección de los elementos de la muestra debe ser hecha conforme a números aleatorios para evitar sesgos en los resultados.

1.2.5.2 Muestreo de registros de consumos en campo en micromedidores existentes

Del total de tomas domiciliarias con micromedidor funcionando, inscritas en el padrón de usuarios del organismo operador, se elige una muestra aleatoria determinada con la ecuación 1.3. Cada uno de los elementos seleccionados se revisa en campo y se anotan los consumos cada semana durante un periodo mensual. Con estos datos se obtiene el consumo unitario promedio individual en cada toma domiciliaria de la muestra en m³/toma/mes. Utilizando entonces la ecuación 1.2 se calcula el consumo unitario global promedio.

En este caso, deberá practicarse una prueba en campo de error de exactitud de los micromedidores de la muestra con el fin de corregir los valores registrados en el análisis. Esta prueba de exactitud se realizará de acuerdo con las especificaciones de la sección 1.2.6.

1.2.5.3 Muestreo de registros de campo en micromedidores nuevos calibrados

La actividad consiste en instalar una muestra de micromedidores nuevos y calibrados en tomas con cuota fija seleccionadas aleatoriamente y realizar en campo el registro de consumos semanalmente, durante un periodo mensual. Con los resultados se obtiene el consumo unitario promedio de cada toma domiciliaria de la muestra y aplicando la ecuación 1.2 se determina el consumo unitario global promedio en m³/toma/mes.

El tamaño de la muestra se determina utilizando la ecuación 1.3, en donde en este caso particular, n_a es el número de tomas domiciliarias que no cuentan con micromedidor (cuota fija) y S_c corresponde a la desviación estándar de los consumos históricos registrados por los usuarios que cuentan con micromedidor.

1.2.6 Muestreo de errores de exactitud de micromedidores

La prueba de error de exactitud en micromedidores nuevos se realiza en bancos de prueba acreditados, según los procedimientos marcados en la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCFI-1994. El error de exactitud del micromedidor se calcula con la ecuación 1.4.

$$\text{Err}_m = \left(\frac{\text{Vol}_{\text{micr}} - \text{Vol}_{\text{patrón}}}{\text{Vol}_{\text{patrón}}} \right) * 100 \quad (1.4)$$

Donde:

- Err_m = Error de exactitud del micromedidor (%)
- Vol_{micr} = Volumen registrado por el micromedidor (l)
- $\text{Vol}_{\text{patrón}}$ = Volumen registrado en un recipiente certificado (l)

Cuando se trata de realizar pruebas de error de exactitud en micromedidores instalados en campo, la actividad de medición de exactitud de errores de micromedición consiste en elegir un micromedidor instalado y funcionando dentro del sistema de agua potable, realizarle una prueba comparativa en campo contra un recipiente certificado y calcular su error con la ecuación 1.4.

Debido a que la cantidad de micromedidores en un sistema suele ser de varios miles, la determinación del error

de exactitud de micromedidores en forma individual no procede por razones de costo y tiempo. Por lo tanto, se realiza un muestreo estadístico, eligiendo aleatoriamente a un grupo de aparatos de prueba. Así, se busca entonces obtener un error de exactitud representativo del total de la población, que puede ser dado por tipo de usuario, marca de micromedidor, nivel de consumo, colonia, etc. El tamaño de la muestra $n_{a_{\text{mic}}}$ se obtiene aplicando la ecuación 1.

$$n_{a_{\text{mic}}} = \frac{Z_c^2}{\text{Err}_{\text{mic}}^2} \%_{\text{mic}} (100 - \%_{\text{mic}}) \quad (1.5)$$

Donde:

- $n_{a_{\text{mic}}}$ = Tamaño de la muestra
- Z_c = Abscisa de la curva de probabilidad de distribución normal, para un nivel de confianza dado
- Err_{mic} = Error esperado en la estimación (%)
- $\%_{\text{mic}}$ = Porcentaje preestimado de micromedidores que tienen un error de exactitud fuera del límite máximo admisible ($\pm 2\%$)

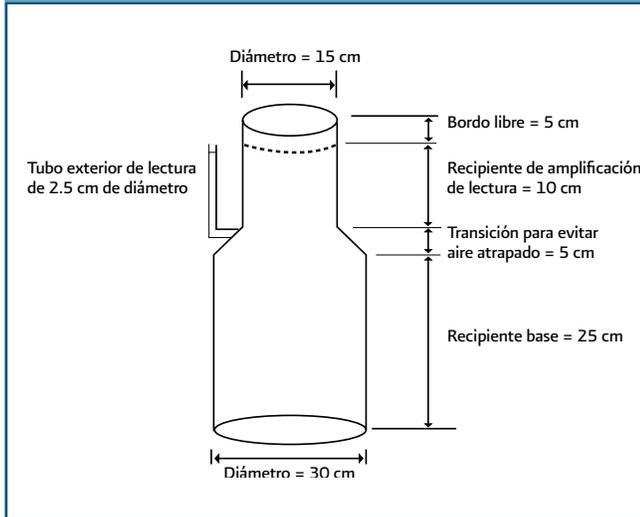
El equipo utilizado para las pruebas de error de exactitud en micromedidores consiste en un recipiente certificado y un accesorio de conexión a la toma domiciliaria, como se observa en la figura 1.5.

Figura 1.5 Equipo utilizado en pruebas de exactitud de micromedidores



El recipiente está disponible en el mercado y está fabricado en acero inoxidable, tiene un volumen de 20 litros aproximadamente y cuenta con una escala graduada al decilitro, colocada cerca de un tubo transparente para visualizar el nivel del agua. En el esquema de la figura 1.6 se muestran las dimensiones del recipiente de prueba.

Figura 1.6 Recipiente para verificación de exactitud en micromedidores



La conexión para la toma domiciliaria se construye con materiales y accesorios comerciales, con una manguera conectada a una llave de paso y un cople rosca-do. Es recomendable instalarle un manómetro comercial tipo Bourdon y una llave de purga de aire.

La prueba de exactitud de micromedidores se realiza con el procedimiento siguiente (ver figura 1.7):

- 1) Primero se llena el formato con los datos de la toma del usuario, que normalmente se obtiene del padrón de usuarios. Los datos son el número de contrato, nombre del usuario, dirección, tipo y modelo del micromedidor.
- 2) Luego se desconecta el micromedidor de la toma domiciliaria en su extremo aguas abajo y se le inserta la conexión de prueba; se debe purgar el aire dentro de la manguera.
- 3) Enseguida se toma la lectura del micromedidor, en litros y decilitros.
- 4) Se abre la llave de la conexión de prueba y se llena el recipiente calibrado hasta la marca de los 20 litros, aproximadamente.
- 5) Se registra nuevamente la lectura del micromedidor.

- 6) Se anotan los valores y se repite la prueba dos o tres veces.
- 7) Se calcula el error de exactitud de cada prueba con la ecuación 1.4 y se hace un promedio para obtener el error del micromedidor. Si el error resulta negativo se dice que el micromedidor está submidiendo y si es positivo, entonces está sobremidiendo.

Figura 1.7 Prueba en campo de exactitud de micromedidores



Como un dato útil, una cuadrilla formada por un ingeniero y su ayudante pueden realizar la verificación de aproximadamente 25 micromedidores por día.

Una vez realizadas todas las pruebas de campo en cada micromedidor seleccionado en la muestra, se realiza un análisis estadístico de la frecuencia del error, el error medio, la desviación estándar, entre otros, para establecer el valor representativo de la exactitud de la población total de micromedidores funcionando en un sistema de agua potable.

1.2.7 Muestreo de ocurrencia de fugas

La evaluación de ocurrencia de fugas se realiza mediante un método estadístico (Arreguín y Ochoa, 1997)², con el cual se pueden estimar con suficiente aproximación y confiabilidad, la cantidad de agua perdida debido a fugas existentes en el sistema de distribución, discriminadas

² Arreguin Cortes F. y Ochoa Alejo L., 1997, "Evaluation of Water Losses in Distribution Networks", Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Sep-Oct, USA.

en tomas domiciliarias, tuberías y cajas de válvulas, así como también las variables físicas y de operación asociadas a dichas fugas, con lo cual se determinan los efectos y causas del problema.

El método propone que las fugas sean estimadas como sigue:

- 1) Con estudios de campo se estiman los volúmenes perdidos por fugas en tomas domiciliarias (Vol_{ftd}) y el porcentaje de tomas que presentan fuga.
- 2) El volumen de fugas de las tuberías principales y secundarias (Vol_{pft}) se calcula del balance de agua del sistema de abastecimiento (sección 2.1 de este Manual), restando los valores obtenidos de los estudios de campo de tomas domiciliarias, de los consumos ($Vol_{consumido}$) y del volumen entregado a la red ($Vol_{suministrado}$).
- 3) Para mejorar la estimación de los volúmenes de fugas en tuberías principales y secundarias se resta el volumen de fugas de cajas de válvulas (Vol_{fcv}). Las fugas en cajas de válvulas se obtienen con otro estudio de campo.

Para la aplicación del método es deseable que se cuente con un mínimo de información estadística en el sistema de agua potable, como por ejemplo, el porcentaje global de ocurrencia de fugas, el caudal promedio de fugas, la ocurrencia espacial de fugas por colonias o sectores, presiones de la red, entre otras.

Cuando no se disponga de registros históricos de ocurrencia de fugas, se debe realizar una encuesta piloto (premuestrío), de los reportes de las cuadrillas de reparación del organismo operador de al menos 15 días. Para ello se diseña un formato que contenga los datos de falla, lugar, elemento del sistema, caudal de la fuga, tipo de material del suelo y tubería, presión de la tubería donde ocurrió, etc. Los datos serán colectados por las cuadrillas durante su trabajo.

1.2.7.1 Evaluación de fugas en tomas domiciliarias (Vol_{ftd})

El porcentaje y volumen de agua perdida por fugas en tomas domiciliarias de una población Pob , se estima de dos muestras aleatorias simples, cuyos tamaños son determinados de la teoría de muestreo estratificado.

1.2.7.1.1 Porcentaje de fugas en tomas domiciliarias

La primera muestra sirve para determinar el porcentaje de tomas domiciliarias que presentan fuga. Este porcentaje se determina a partir de observaciones de campo en cada una de las tomas domiciliarias del estudio. Los resultados encontrados se contabilizan y se infieren a toda la población.

El tamaño de la muestra (na_0), se calcula usando la ecuación 1.6.

$$na_0 = \frac{Z_c^2}{Err_{ft}^2} \%_{ft} (100 - \%_{ft}) \quad (1.6)$$

Donde:

- na_0 = tamaño de la muestra
- Z_c = Abscisa de la curva de probabilidad de distribución normal para un nivel de confianza dado
- Err_{ft} = Error esperado en la estimación (%)
- $\%_{ft}$ = Porcentaje de ocurrencia de fugas preestimado

El porcentaje de ocurrencia de fugas preestimado ($\%_{ft}$) se obtiene de los registros históricos. En el caso extremo de que sea prácticamente imposible determinar los porcentajes por la ausencia de estadísticas, se supondrá un valor de ocurrencia de fugas en tomas domiciliarias del 25%, mismo que se ajustará conforme se obtengan los resultados de las inspecciones en campo.

El error en la estimación (Err_{ft}) representa la máxima diferencia entre el porcentaje de fugas obtenido en la muestra y el porcentaje esperado real; a menor error en la estimación, el valor esperado es más cercano al estimado estadísticamente, y viceversa. Un valor recomendado del error en la estimación es 5%.

El nivel de confianza se selecciona de acuerdo con la disponibilidad de recursos y en función de las necesidades de precisión estadística deseada. Un análisis de sensibilidad, derivada de la información de 15 ciudades donde se aplicó el método, permitió determinar que, el incremento en costo del estudio al aumentar el nivel de confianza de 95% a 99%, es del orden del 80%, como se muestra en la tabla 1.3.

Tabla 1.3 Costo del estudio con respecto al nivel de confianza esperado

Nivel de confianza (%)	Tamaño de muestra (tomas domiciliarias)	Costo del estudio (Dólares estadounidenses)
70	108	3 240
75	132	3 960
80	163	4 890
85	207	6 210
90	272	8 160
95	384	11 520
99	676	20 280

Calculado de los datos de 15 ciudades estudiadas con un error en la estimación (Err_r) del 5% y porcentaje ($\%_r$) del 50%

Es necesario asegurar que el tamaño de la muestra tenga un mínimo de 30 tomas domiciliarias a observar (des Raj, 1992)³; aquellas muestras con menos elementos deben ser tratadas como muestras pequeñas.

Cuando el tamaño de la muestra (na_0), sea más grande que el 5% del número total de tomas domiciliarias conectadas al sistema de distribución (N), el tamaño de la muestra (na) debe ser corregido, utilizando la ecuación 1.7.

$$na = \frac{na_0}{1 + (na_0/N)} \quad (1.7)$$

Una vez determinado el tamaño de la muestra, se seleccionan con números aleatorios del listado de usuarios del sistema de agua potable, las tomas domiciliarias que se estudiarán en campo.

El trabajo de campo consiste en inspeccionar la existencia de fugas en las tomas domiciliarias seleccionadas. Esta inspección física de tomas domiciliarias se lleva a cabo, basándose en los métodos de detección de fugas por caída de presión diferencial o por sonido.

Para confirmar la existencia de fugas, se procede a hacer excavación en la toma domiciliaria en cuestión. Para cada toma domiciliaria inspeccionada en la muestra, se asigna un valor de 1 si aparece con fuga, y si no, un valor de cero (como fuga se considera cualquier escape de agua, desde la inserción de la toma hasta el micromedidor).

El porcentaje de fugas se obtiene dividiendo el número de tomas domiciliarias encontradas con fuga entre el tamaño de muestra. Después, este valor se extrapola hacia el total de tomas domiciliarias de la ciudad, multiplicando el porcentaje de tomas domiciliarias con fuga determinado con la muestra, por el número de tomas conectadas en el sistema de agua potable.

1.2.7.1.2 Volumen de fugas en tomas domiciliarias

La segunda muestra sirve para calcular el volumen de agua perdida por fugas en las tomas domiciliarias. El tamaño de la muestra (na_q) se calcula utilizando la ecuación 1.8 (Spiegel, 1991)⁴:

$$na_q = \frac{Z_c^2}{Err_q^2} S_{qi}^2 \quad (1.8)$$

Donde:

- na_q = Tamaño de la muestra
- Z_c = Abscisa de la curva de distribución normal para un nivel de confianza dado
- S_{qi} = Desviación estándar del gasto de fuga en tomas domiciliarias (ml/s)
- Err_q = Error esperado en la estimación del caudal unitario de fugas en tomas domiciliarias (ml/s)

Si no se cuenta con antecedentes estadísticos, al iniciar un muestreo aleatorio de fugas no se sabe cuál es la desviación estándar del gasto de fugas (S_{qi}). En estos casos, la desviación estándar se puede estimar a partir del aforo de las fugas encontradas durante la inspección de ocurrencia. La ecuación 1.8 se deberá entonces ir ajustando conforme se vayan realizando los aforos subsiguientes.

El trabajo de campo consiste en aforar las fugas que se presentan en las tomas domiciliarias inspeccionadas en el primer muestreo. El aforo de fugas se realiza colocando un recipiente calibrado a un volumen establecido y midiendo el tiempo en que se llena. El gasto de las fugas será el volumen dividido entre el tiempo respectivo. La prueba se repite tres veces para evitar errores.

Los caudales unitarios de fuga (Q_{ai}), determinados a partir de las mediciones en las tomas domiciliarias, se

³ Des Raj, 1992, "Teoría del Muestreo", Fondo de Cultura Económica, Segunda Edición, México.

⁴ Spiegel, 1991, "Estadística", Segunda edición, España.

promedian y se multiplican por el total de tomas domiciliarias con fuga del primer estudio de campo y por el periodo de análisis y de permanencia de las fugas. Este valor es el total de volumen de fugas en tomas domiciliarias del sistema de agua potable (Vol_{ftd}) en el periodo establecido para el análisis.

Si el suministro de agua es intermitente en algunas porciones de la ciudad, el volumen de fugas de tomas domiciliarias se modifica multiplicando las pérdidas de cada zona de tandeo por el periodo en que el agua es suministrada.

Adicionalmente a los valores de volúmenes de pérdidas, durante el aforo de las fugas se hace un reporte de las variables físicas donde se presentó dicha fuga (material de la tubería, tipo de falla, suelo, profundidad, etc.) para interpretar las posibles causas del problema. No hay que olvidar que todos los registros de campo de las mediciones deberán presentarse en formatos similares al mostrado en la tabla A.1 del Anexo A.

1.2.7.2 Evaluación de fugas en cajas de válvulas

La estimación del volumen de fugas en cajas de válvulas (Vol_{fcv}) se realiza a través de dos muestreos aleatorios simples con inspecciones y aforos en campo de ocurrencia de fugas. Los tamaños de las muestras de cajas de válvulas na_v y na_{qv} se calculan con las ecuaciones 1.9 y 1.10, para obtener el porcentaje de cajas de válvulas que tienen fuga y estimar el caudal unitario promedio de las fugas, respectivamente.

$$na_v = \frac{Z_c^2}{Err_{fv}^2} \%_{fv} (100 - \%_{fv}) \quad (1.9)$$

Donde:

Z_c = Abscisa de la curva de probabilidad de distribución normal, para un nivel de confianza dado

Err_{fv} = Error esperado en la estimación, en el porcentaje de cajas de válvulas con fugas

$\%_{fv}$ = Ocurrencia de fugas en cajas de válvulas (%)

$$na_{qv} = \frac{Z_c^2}{Err_{qv}^2} S_{qv}^2 \quad (1.10)$$

Donde:

Z_c = Abscisa de la curva de distribución normal para un nivel de confianza dado

S_{qv} = Desviación estándar del gasto de fuga en cajas de válvulas (ml/s)

Err_{qv} = Error esperado en la estimación del caudal unitario de fugas en cajas de válvulas (ml/s)

Para poblaciones pequeñas, los tamaños de las muestras deben ajustarse con la ecuación 1.7; no obstante, el número de cajas de válvulas por inspeccionar será igual o mayor a 30 elementos con el fin de garantizar que sea una muestra grande.

Una vez calculado el número de cajas de válvulas por inspeccionar, se eligen aleatoriamente consultando un plano de la red. En este plano se ubican todas las cajas del sistema de agua potable y se trazan ejes cartesianos (x,y); entonces se elige una pareja de números aleatorios, y estos corresponderán con las coordenadas respectivas de la caja seleccionada.

Luego de identificar en el plano a cada una de las cajas de válvulas de la muestra, se procede de manera similar al muestreo de tomas domiciliarias para calcular el volumen total de fugas en cajas de válvulas en la ciudad. Los trabajos de campo se realizan según lo indicado en la sección 1.2.8.

1.2.7.3 Evaluación de fugas en tuberías principales y secundarias

Para estimar el volumen de las fugas en tuberías principales y secundarias se aplica un balance de agua, según lo indicado en la sección 2.1. de este Manual.

1.2.8 Levantamiento de cajas de válvulas

El trabajo físico del levantamiento de cajas de válvulas es una actividad que tiene varios objetivos, entre los cuales se menciona: complementar la actualización de los planos de la red de distribución de agua, evaluar el estado de las cajas y válvulas, y detectar fugas en los estoperos, volantes y juntas de las válvulas.

En cualquiera de los casos mencionados, antes de iniciar el trabajo de campo, es necesario disponer de un formato que contenga los espacios suficientes para anotar su ubicación geográfica, el croquis de localización y su

detalle de fontanería, datos de su estado, diámetros, y dos fotografías de la válvula, una de lejos y una de cerca. Toda la información se digitaliza en un plano en archivo

de AutoCad y se forman fichas por cada una de las cajas de válvulas inspeccionadas. En la figura 1.8 se presenta una ficha tipo de caja de válvula inspeccionada en campo.

Figura 1.8. Ficha técnica tipo de inspección de caja de válvulas

Calles: Av. Mar del Norte Esq. Av. Diana Laura Riojas			
Colonia: Guaymas Norte			
No. de cruce: 1			
No. de tapas: 1	No. de válvulas: 2		
Referencias:			
		Croquis de localización	
La caja se encontraba azolvada por:	Tierra	Basura	Inundada

Características de la válvula

Diámetro (plg) 6"

Tipo de vástago: fijo de cuadro

Comentarios: válvula completamente abierta



Fotografía de la válvula

Características de la válvula

Diámetro (plg) 4"

Tipo de vástago: válvula reguladora de presión

Comentarios: calibrada a 15 PSI



Fotografía de localización

Observaciones generales: La tubería de 6" suministra agua a las colonias Las Torres y Maquilas

El trabajo de campo es sencillo y consiste en ubicar la caja por inspeccionar, destaparla y registrar los datos respectivos. En caso de que se encuentre azolvada o inundada será necesaria su limpieza, pero deberá anotarse esta situación en los formatos correspondientes. Una cuadrilla formada por un ingeniero y un ayudante puede realizar la inspección del orden de 20 cajas diarias.

También se recomienda realizar un resumen analítico de resultados globales formando cuadros como los mostrados en la tabla 1.4.

Tabla 1.4 Resumen de inspección de cajas de válvulas

Resumen de condición del interior de las cajas de válvulas		
Condición	Cantidad	Porcentaje
Tierra	48	65%
Basura	3	4.1%
Inundada	6	8.1%
Buen Estado	17	23.0%
Total	74	100.0%

Resumen de condición de las losas y las tapas en las cajas de válvulas		
Condición	Cantidad	Porcentaje
Daño en losa	0	0.0%
Sin losa	0	0.0%
Sin tapa	2	2.7%
Tapa soldada	0	0.0%
Tapa sin fijación	6	8.1%
Buen estado	66	89.2%
Total	74	100.0%

Con estos resultados es posible determinar las inversiones para limpieza, sustitución o rehabilitación, cambios de tapas, etc., y valorar el gasto unitario de fugas promedio, así como su porcentaje de ocurrencia.

1.2.9 Levantamientos topográficos

Para efectos del análisis hidráulico del sistema de agua potable en los proyectos de eficiencia, es determinante conocer la elevación de las tuberías, captaciones, tanques de regulación y rebombes, ya que un error en la cota topográfica del nivel del agua en un tanque de un metro puede cambiar sustancialmente los parámetros de

velocidad y presión en la red. Por tal motivo, es necesario revisar y actualizar la topografía de la ciudad en estudio con el levantamiento topográfico.

El levantamiento topográfico comienza por el análisis de los planos existentes para identificar la cantidad de información con la que se cuenta y definir los trabajos complementarios de campo. Normalmente, los datos de topografía que interesa determinar para realizar estos proyectos de eficiencia son las cotas de los cruces de la red de distribución, cotas de desplante de los pozos y tanques de regulación, y los perfiles de las líneas de conducción existentes.

Antes de proceder a ejecutar trabajos de campo de topografía, se recomienda consultar la base de datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), puesto que este órgano cuenta con varios estudios de topografía y urbanización a detalle de varias poblaciones mexicanas, que son económicos y de fácil acceso.

Los trabajos de campo de topografía, tanto de cruces, cotas de tanques y pozos y perfiles de conducciones se ejecutan según las especificaciones definidas en el Manual de Lineamientos Técnicos para la Elaboración de Estudios y Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario (MAPAS), CONAGUA.

Es importante mencionar que, actualmente existen en el mercado equipos comerciales para obtener los datos topográficos de las estructuras y cruces de la red de distribución de agua potable, entre ellos se encuentra “La Estación Total (ET)” y el “Sistema de Posicionamiento Global (GPS)”. Estos equipos permiten descargar los valores levantados en campo directamente al Auto-Cad, son versátiles y de rendimiento alto.

1.2.10 Vinculación de tomas domiciliarias

La vinculación de tomas domiciliarias tiene por objeto detectar irregularidades en el padrón de usuarios del organismo operador del sistema de agua potable. Las irregularidades se refieren a las diferencias que existen entre lo que describe el contrato del usuario con lo que se encuentra físicamente en el lugar de la toma domiciliaria. Las irregularidades comunes son: usos de agua distintos a los registrados en el padrón de usuarios, equivocación en la existencia de micromedidor funcionando, nombre del usuario sin actualizar tomas domiciliarias inactivas, usos fraudulentos y clandestinos.

La vinculación de tomas domiciliarias comienza con la selección de rutas de recorrido. Para ello, es conveniente utilizar la experiencia del organismo operador aplicando los mismos recorridos que se realizan durante la toma de lectu-

ras de consumos. De hecho, esta información normalmente tiene cierta correspondencia con el listado de los usuarios del padrón. En la figura 1.9 se muestra un croquis típico de recorrido para la vinculación de tomas domiciliarias.



Luego de definir las rutas, se prepara un formato de encuesta a los usuarios y revisión de la toma domiciliaria. Interesa corroborar el nombre del usuario, la existencia de varias tomas domiciliarias en un mismo predio, el giro del inmueble, el estado físico del micromedidor, la correspondencia con el número de contrato y serie catastral, la existencia de fugas, la posibilidad de un fraude o clandestinaje, la satisfacción del usuario con el servicio de agua. El formato puede ser preparado según convenga en cada estudio. En la tabla A.2 del Anexo A se muestra un ejemplo de estos formatos.

El procedimiento de campo para realizar las encuestas y verificaciones no sigue ninguna norma específica, por lo que puede definir cada quien su propia estrategia de

actuación. No obstante, algunas recomendaciones útiles son las siguientes:

- 1) Realizar recorridos siguiendo rutas dentro de una misma área o zona. Se debe evitar recorridos dispersos puesto que disminuyen los rendimientos de la actividad.
- 2) Los encuestadores deben portar un gafete y al menos una playera con logotipos oficiales del organismo operador para facilitar las labores y evitar la desconfianza de los usuarios.
- 3) Evitar que dos encuestadores se dividan una ruta para asegurar que esta se realice al 100% y no exista duda alguna de los datos.

- 4) Estandarizar los criterios de detalles sobre claves de identificación, marcas y modelo de micromedidores, diámetro de las tomas, longitudes, usos del servicio de agua, entre otros.
- 5) Las rutas de recorrido deberán ser del orden de 500 predios como máximo con el fin de tener mejor control de la supervisión de la actividad.

La experiencia en esta actividad indica que una persona puede revisar adecuadamente alrededor de 70 predios por día en zonas de clase media y populares. En zonas residenciales el rendimiento disminuye un 25% por la baja densidad de las viviendas. En zonas marginadas el rendimiento disminuye hasta un 40% debido a la traza urbana irregular en estas zonas y a la gran cantidad de asentamientos dispersos.

Paralelamente al levantamiento de encuestas se realiza la actividad de captura de datos en formato digital, con la intención de facilitar su análisis y actualización posterior. Actualmente, existe una tecnología comercial denominada "Sistema de Información Geográfica (SIG)", que permite disponer de bases de datos ligadas al plano catastral de la población, incluso se encuentran georeferenciados a una sistema de coordenadas universal y son compatibles con los sistemas AutoCad y Excel. Por lo tanto, es recomendable que se utilicen estas tecnologías para la captura de datos de la vinculación de las tomas domiciliarias.

1.2.11 Medición de parámetros eléctricos e hidráulicos en equipos de bombeo

Para realizar el diagnóstico de una instalación electromecánica en los sistemas de agua, es indispensable la medición de parámetros tanto hidráulicos como eléctricos. Con base en el resultado de esas mediciones se determina:

- a) La eficiencia electromecánica del conjunto motor-bomba y en forma separada.
- b) La curvas de comportamiento carga – gasto - eficiencia del equipo de bombeo.

Para que las mediciones sean lo más reales posible y, por ende, los valores de eficiencia sean veraces, se debe procurar:

- a) Que los equipos de medición se encuentren calibrados y en buenas condiciones de operación.

- b) El sistema a medir se encuentre en estado estable sin perturbaciones que motiven una medición falsa.

1.2.11.1 Medición de parámetros eléctricos

Los parámetros eléctricos a medir son:

- a) Tensión eléctrica (voltaje)
- b) Corriente eléctrica
- c) Factor de potencia
- d) Potencia real o activa
- e) Potencia reactiva

En estos casos, la utilización de equipo de medición adecuado (voltímetro, amperímetro, wathorímetro, multímetro, etc.) es indispensable.

Para simplificar el proceso de medición, se recomienda utilizar un analizador de redes eléctricas que, además de permitir la medición de parámetros por fases, integre dichas mediciones para obtener directamente los valores trifásicos, almacene en memoria información para obtener tendencias y en la mayoría de los casos, mida otros parámetros eléctricos, que son importantes para evaluar la calidad de la energía utilizada en el equipo, como la distorsión armónica, entre otros.

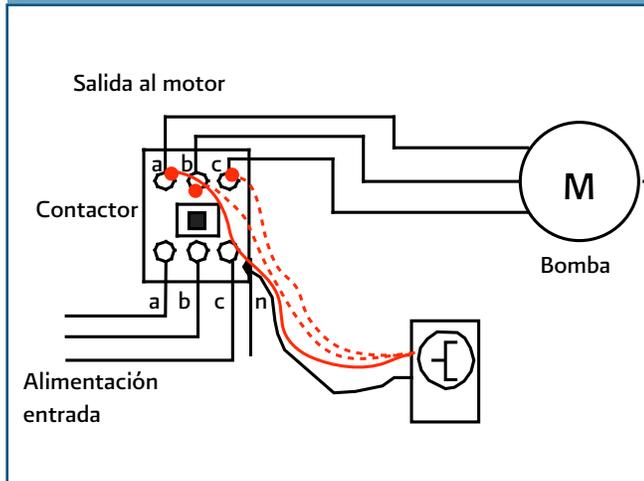
1.2.11.1.1 Medición de tensión eléctrica (Voltaje)

Para realizar la medición de la tensión eléctrica en equipos de bombeo, es necesario la utilización de un voltímetro, teniendo como referencia la figura 1.10, y proceder de la forma siguiente:

- 1) Realizar la medición en los cables de tensión eléctrica que salen del contactor hacia el motor de la bomba.
- 2) Colocar el cable rojo del voltímetro sobre la punta de salida del contactor en la línea "a".
- 3) Colocar el cable negro del voltímetro sobre la punta de tierra "n".
- 4) Registrar la lectura de tensión (V_{an}), correspondiente a la fase "a".
- 5) Repetir la acción, colocando el cable rojo del voltímetro en la punta de salida "b" y "c" del contactor (con el negro a tierra) y tomar lecturas respectivas de tensión (V_{bn}) en fase "b" y tensión (V_{cn}) en fase "c".
- 6) En el caso de la medición de tensión eléctrica entre fases, se debe repetir el procedimiento anterior colocando a la salida del contactor el cable rojo del voltí-

metro en punta "a" y el cable negro en la punta "b"; después entre "a" y "c"; por último entre "b" y "c". Con el promedio de estos tres valores se calcula el valor de la tensión eléctrica trifásica (V). Se recomienda realizar tres lecturas en cada cable para corroborar los datos.

Figura 1.10 Medición de tensión (voltaje) en equipos de bombeo

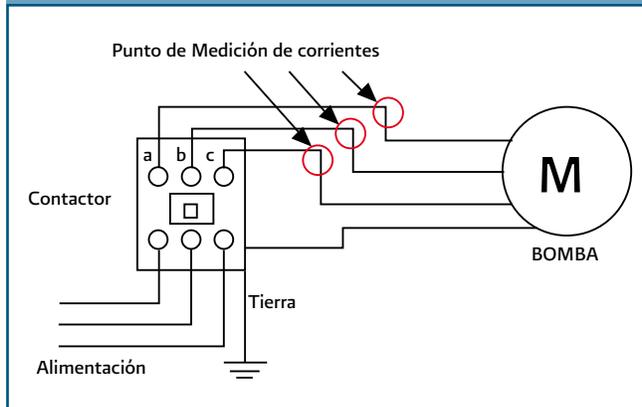


1.2.11.1.2. Medición de corriente eléctrica

La medición de la corriente eléctrica se efectúa con un amperímetro. El procedimiento de medición se efectúa de la manera siguiente, referido a la figura 1.11:

- a) Cuando se utiliza un amperímetro monofásico, las lecturas de corriente eléctrica se realizan una por una, colocándolo en cada uno de los tres cables que salen del contactor y que alimentan al motor. Las lecturas, registradas en cada cable, serán a las corrientes de las fases I_a , I_b , I_c , respectivamente. Con estos tres valores se calcula la corriente promedio de fases que es la corriente eléctrica trifásica total (I_{tt}). Se recomienda realizar tres lecturas en cada cable para corroborar los datos.
- b) En caso de utilizar un analizador de redes, no será necesario realizar las lecturas de corriente eléctrica en forma individual, sino colocar los tres amperímetros simultáneamente en cada uno de los cables que salen del contactor y alimentan al motor. Así, las lecturas de las corrientes eléctricas de cada cable se obtiene directamente en la pantalla del analizador.

Figura 1.11 Medición de corriente eléctrica en equipos de bombeo



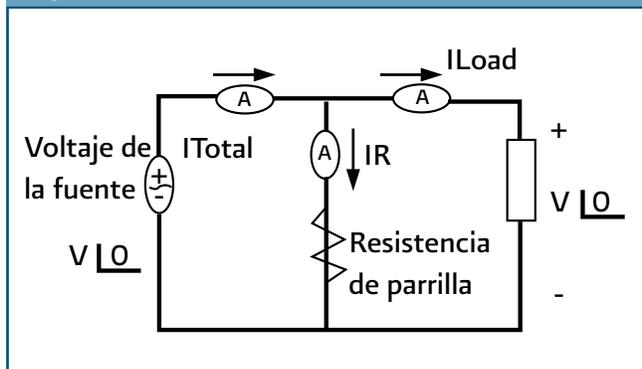
1.2.11.1.3 Medición del factor de potencia y cálculo de la potencia eléctrica

La medición del Factor de Potencia (FP), se puede realizar de la misma manera que la medición de corriente o la de tensión, usando además una resistencia similar a la que tienen las parrillas eléctricas. Este método es muy práctico porque en ocasiones no se tiene un wathhorímetro a la mano. De esta forma, el valor del factor de potencia se obtiene utilizando solo el amperímetro o el voltímetro y aplicando las fórmulas matemáticas de ley de los senos y cosenos.

1.2.11.1.3.1 Medición del factor de potencia con amperímetro

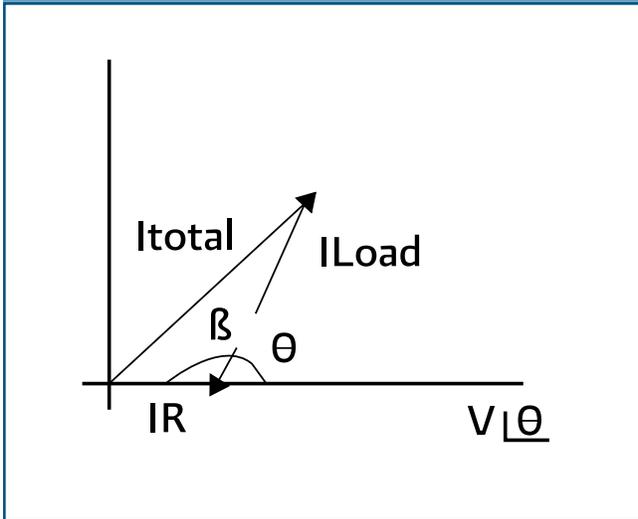
- a) Conectar en paralelo la resistencia con la carga de la cual se quiere medir el Factor de Potencia (puede ser un motor) como se observa en la figura 1.12:

Figura 1.12 Medición del factor de potencia con amperímetro



La relación de corrientes se representa de acuerdo a la relación de ángulos que se muestra en la figura 1.13:

Figura 1.13 Relación de corrientes de acuerdo a la relación de ángulos



- b) Anotar los valores de la corriente que entrega la fuente (I_{Total} o I_T), la corriente que pasa por la resistencia (I_R o I_R) y la corriente que pasa por la carga (I_{Load} o I_L).
- c) Posteriormente se calcula el Factor de Potencia (FP) o $\cos \theta$, resolviendo el problema como un análisis vectorial y aplicando las leyes de Kirchoff suponiendo que el ángulo del voltaje es cero y calculando el ángulo θ , de la forma siguiente:

Como ya se conocen las magnitudes I_L , I_T , I_R , se calcula el ángulo β mediante la fórmula:

$$\cos \beta = \frac{I_R^2 + I_L^2 + I_T^2}{2I_R I_L} \quad (1.11)$$

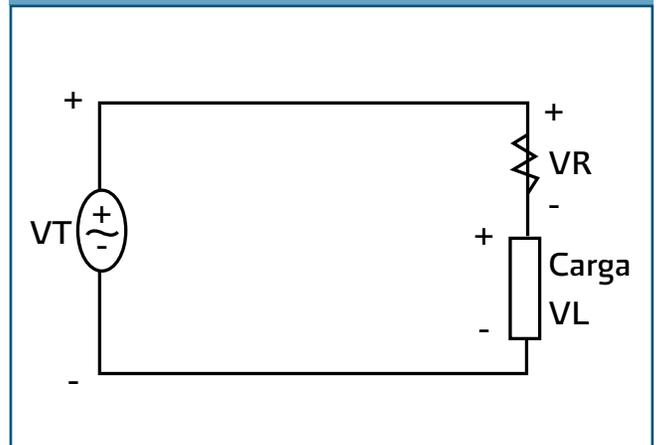
por lo tanto, $\theta = 180 - \beta$

$$\text{F.P.} = \cos (180 - \beta)$$

1.2.11.1.3.2 Medición del factor de potencia con un voltímetro

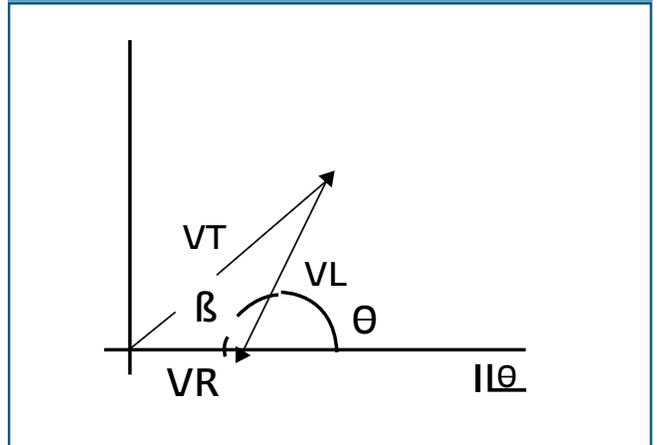
Este método es similar al visto anteriormente pero ahora con un voltímetro y un circuito en serie y suponiendo que la corriente tiene un ángulo de cero, como se muestra en la figura 1.14:

Figura 1.14 Medición del factor de potencia con voltímetro



La relación angular se muestra en la figura 1.15:

Figura 1.15 Relación de voltajes de acuerdo a la relación de ángulos



De manera similar al método anterior con valores de corriente, los pasos a seguir son:

- a) Anotar los valores del voltaje que entrega la fuente (V_T), el voltaje que pasa por la resistencia (V_R) y el que pasa por la carga (V_L).
- b) Posteriormente se resuelve el problema como un análisis vectorial y aplicando las leyes de Kirchoff suponiendo que el ángulo de la corriente es cero y calculando el ángulo θ , de la forma siguiente:

Como ya se conocen las magnitudes V_L , V_T , V_R se calcula el ángulo β mediante la siguiente fórmula:

$$\cos\beta = \frac{V_R^2 + V_L^2 + V_T^2}{2V_R V_L} \quad (1.12)$$

Por lo tanto, $\theta = 180 - \beta$

FP = $\cos(180 - \beta)$

Con el valor de FP, la corriente eléctrica y la tensión eléctrica medida anteriormente, se puede calcular la potencia activa (P_a) utilizando la fórmula siguiente:

$$P_a \text{ (Watts)} = VI_{tt} \cos(180 - \beta) \quad (1.13)$$

1.2.11.1.4 Potencia real o activa

Para medir la potencia real se utiliza un wathorímetro, el cual se coloca a la salida del contactor en los cables que van hacia el motor. El procedimiento para realizar la medición del valor de la potencia real o activa es el siguiente:

- 1) Se colocan las terminales de voltaje del wathorímetro sobre el cable de la fase "a".
- 2) Enseguida se coloca la otra terminal de voltaje del wathorímetro en el cable neutro "n".
- 3) Se inserta el gancho del amperímetro en el cable de la fase "a".
- 4) Se registra la lectura de la potencia real o activa directamente en el wathorímetro.
- 5) Se repite el proceso anterior para obtener la potencia real en las fases "b" y "c".

Si el equipo de bombeo tiene instalado un banco de capacitores, se sugiere hacer dos mediciones (ver figuras 1.16 y 1.17):

- a) La primera de ellas se debe realizar corriente abajo del punto de conexión del banco de capacitores, en los conductores que van directamente a la bomba sumergible o al motor en bombas verticales de flecha, con el objeto de que las mediciones no se vean influenciadas por el efecto de compensación de los capacitores y reflejen la situación real del motor eléctrico en evaluación.
- b) La segunda medición debe realizarse corriente arriba del capacitor. Esta medición describirá el efecto de la compensación del factor de potencia sobre la red eléctrica.

Figura 1.16 Medición de la potencia real antes de los capacitores

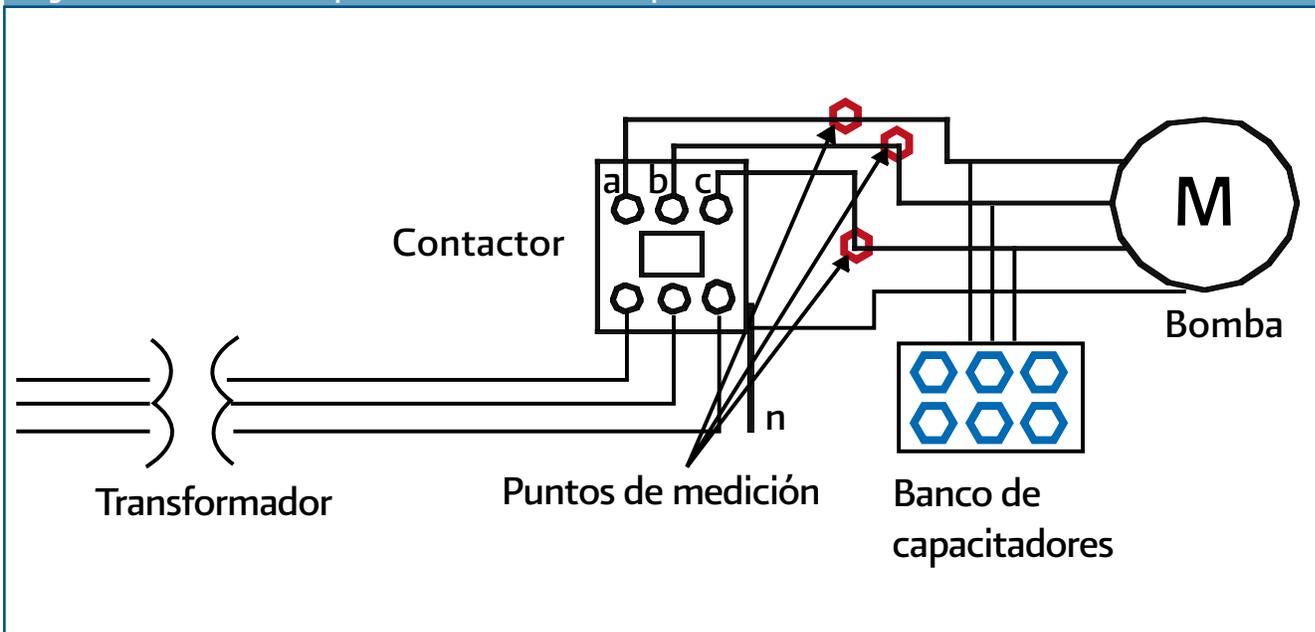
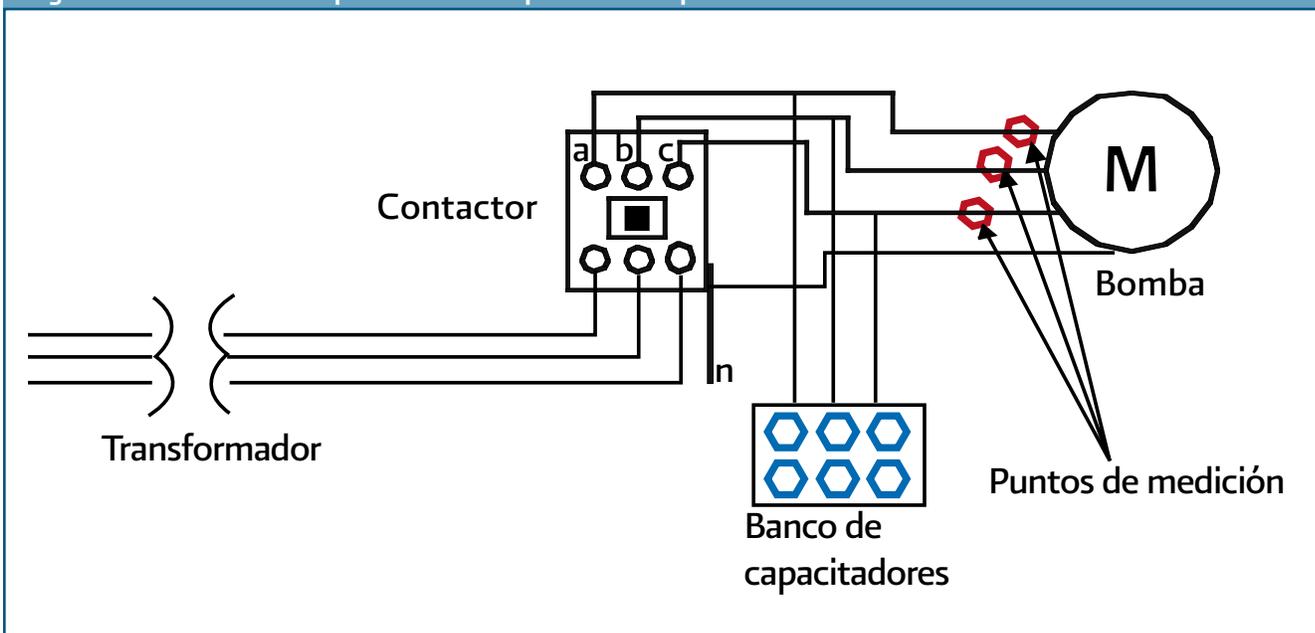


Figura 1.17 Medición de la potencia real después de los capacitores



1.2.11.2 Medición de parámetros hidráulicos

Como en el caso de la medición de parámetros eléctricos, para la medición de los parámetros hidráulicos se deberán tener los equipos de medición calibrados y en buenas condiciones de uso. Asimismo, cuando se efectúen las mediciones, el sistema no debe tener perturbaciones. En el caso de instalaciones unitarias, como pozos o equipo de bombeo, las mediciones se hacen directamente en el tren de descarga. Para las instalaciones que integran a varios equipos de bombeo, se deben realizar las mediciones de los parámetros hidráulicos individualmente sobre su tubería de descarga.

La curva de funcionamiento gasto vs carga hidráulica total de bombeo ($Q-H_b$) se construye realizando mediciones de estos dos parámetros, modificando en cada lectura de datos las condiciones de operación.

Los parámetros hidráulicos y los datos de referencia que se deben obtener son los siguientes:

- Medición del caudal a la descarga en la bomba (Q)
- Medición de la carga de presión de operación, en la succión (p_s) y descarga (p_d)
- Definición del nivel de referencia (N_r)
- Medición del nivel dinámico de succión (ND_s)
- Medición de niveles a centros de manómetros (D_{r-m}), tanto en la succión como en la descarga según el caso explicado más adelante

1.2.11.2.1 Medición del caudal a la descarga de la bomba

Para la medición del caudal (Q_d) debe seguirse la metodología y recomendaciones expuestas en el punto 1.2.2 de este Manual. En el caso de instalaciones electromecánicas con una batería de varios equipos, como por ejemplo los rebombes, la medición de caudal debe hacerse por equipo individual, cuidando que se encuentre en la condición de operación más usual, con el fin de evaluar la situación energética en las condiciones comunes de operación.

1.2.11.2.2 Medición de cargas de presión de succión y descarga

Para realizar las mediciones de las cargas de presión de succión (p_s) y descarga (p_d), se recomienda el uso de manómetros tipo Bourdon, de preferencia los que contienen glicerina, asegurándose de su buena calibración, y que se use en el tercio medio de su escala, puesto que es donde su exactitud es la óptima. La manera de realizar la medición se muestra en las imágenes de la figura 1.18.

Para efectos prácticos, en los cálculos se recomienda expresar la presión en carga piezométrica, es decir en metros columna de agua (m.c.a.), aunque los manóme-

Figura 1.18 Medición de presión con manómetro tipo Bourdon calibrado



tros suelen tener escalas de kg/cm^2 o $\text{lb}/\text{pulgada}^2$. Las equivalencias de estas unidades son las siguientes:

- $\text{kg}/\text{cm}^2 = 10 \text{ m.c.a.}$
- $1 \text{ lb}/\text{pulgada}^2 = 0.7031 \text{ m.c.a.}$

Las mediciones de presión de succión y descarga deberán hacerse lo más cerca de la bomba. En caso de que no sea posible hacer la medición en la succión, por tratarse de una bomba vertical, o porque no haya puerto de medición disponible, se debe indicar en los formatos de registro de mediciones que no aplica la medición de

succión. La medición de la presión en la descarga sí es indispensable realizarla.

1.2.11.2.3 Definición del nivel de referencia

Para el cálculo de la carga hidráulica total de bombeo, es conveniente definir un nivel de referencia, a partir del cual se medirán los otros niveles. Normalmente, el nivel de referencia se ubica sobre la placa base de montaje del motor, como se observa esquemáticamente en las figuras 1.19 y 1.20.

Figura 1.19 Medición de niveles en caso de tener únicamente manómetro en la descarga

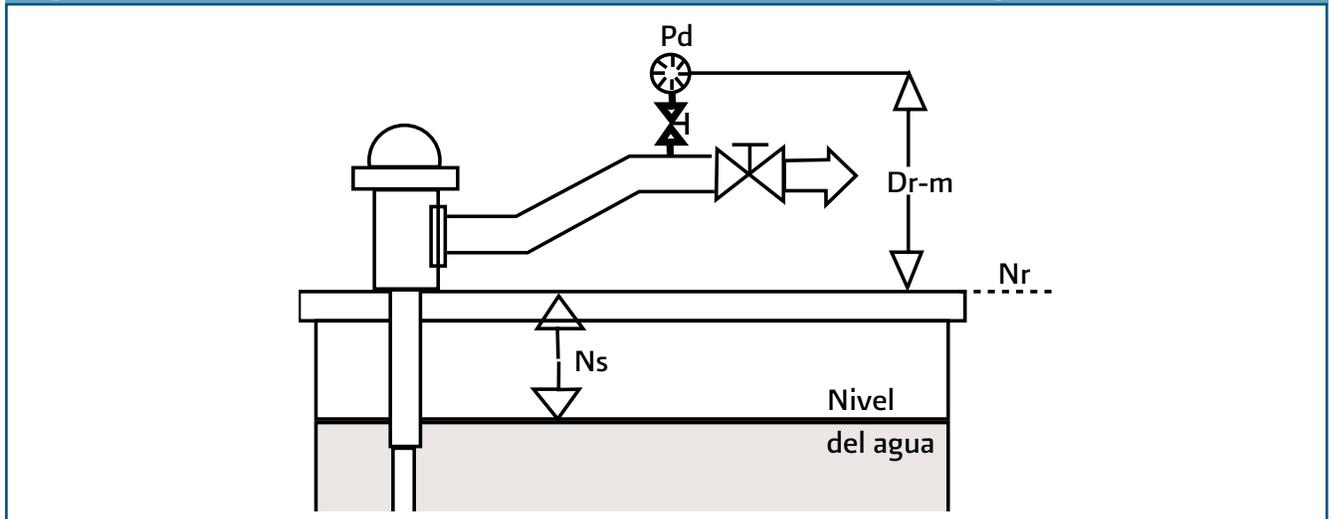
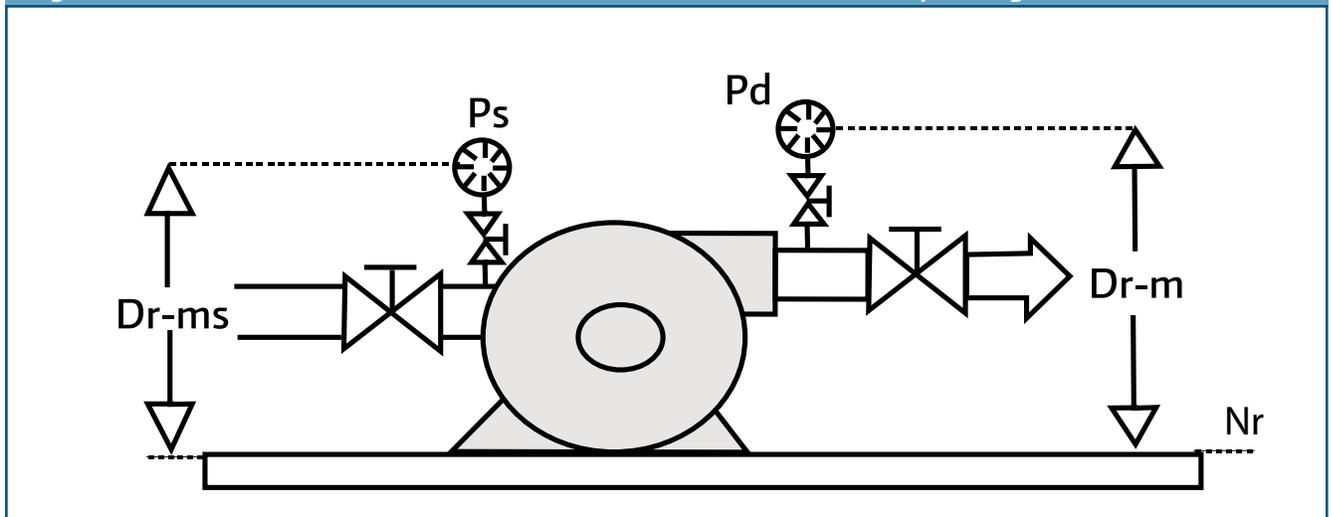


Figura 1.20 Medición de niveles en caso de contar con manómetros en succión y descarga



En el caso de equipos de bombeo sumergibles, el nivel de referencia es normalmente el nivel de piso.

Figura 1.21 Medición del nivel dinámico de succión en cárcamos de rebombeo



1.2.11.2.4 Medición del nivel dinámico de succión

El nivel de succión (ND_s) es la distancia vertical entre el nivel de referencia y el espejo de agua de donde se está bombeando el agua, en condiciones de operación normal y estable. La medición puede realizarse con una sonda de nivel o con un flexómetro, dependiendo de las condiciones del lugar.

En el caso de un cárcamo de bombeo, el nivel dinámico de succión será el nivel de la superficie libre del agua dentro del cárcamo. Y en el caso de un pozo, el nivel de succión corresponde a su nivel dinámico en el acuífero. En las imágenes de la figuras 1.21 y 1.22 se muestra la medición de nivel dinámico con una sonda eléctrica.

Si durante la medición en un cárcamo o tanque, el nivel del agua cambia de posición significativamente, entonces la medición del nivel de succión debe hacerse de manera simultánea a las mediciones de caudal, presión y parámetros eléctricos. El valor podrá ser negativo o positivo, dependiendo si el nivel se encuentra por debajo o por encima del nivel de referencia.

1.2.11.2.5 Medición de niveles a centros de manómetros

En las figuras 1.19 y 1.20 se observa la manera de ubicar los niveles a centros de manómetros. Si solo se mide la carga de presión a la descarga, este nivel será designado como D_{r-m} . Para el caso de que se midan las cargas de presión tanto a la succión como a la descarga, el nivel del manómetro de descarga será designado como D_{r-md} y para el caso del manómetro de succión, como D_{r-ms} .

1.2.11.2.6 Determinación de la carga hidráulica de bombeo

Las mediciones de presión y niveles descritos en los incisos 1.2.11.2.1 a 1.2.11.2.5 se utilizan para calcular la carga hidráulica total de bombeo (H_p), la cual está constituida por la suma de varios valores medidos, que dependerán del tipo de bomba y el arreglo que se tenga. En la tabla 1.5, se describe el proceso de cálculo y los parámetros a considerar en la determinación de la carga hidráulica total de bombeo dependiendo del tipo de equipo y la aplicación en turno.

Figura 1.22 Medición del nivel dinámico en cárcamos de bombeo



Tabla 1.5 Proceso de cálculo para la carga hidráulica de bombeo (H_b) y parámetros a medir

Caso	Fórmula	Parámetros a medir o calcular
<p>Quando solo se mide la presión a la descarga</p>	$H_b = p_d + ND_s + D_{r-m} + h_{fs} + H_v$	<p>H_b = Carga total de bombeo (m) p_d = Carga de presión en la descarga (m.c.a.) ND_s = Nivel dinámico de succión (m) D_{r-m} = Distancia del nivel de referencia a manómetro (m) h_{fs} = Pérdidas de carga hidráulica por efecto del cortante en la tubería de succión, más accesorios (m) H_v = Carga de velocidad (m)</p>
<p>Quando se miden presión a la succión y descarga</p>	$H_b = p_d - p_s + D_{r-ms} + D_{r-md}$	<p>H_b = Carga total de bombeo (m) p_d = Carga de presión en la descarga (m.c.a.) p_s = Carga de presión de succión (m) D_{r-ms} = Distancia del nivel de referencia al manómetro en la succión (m) D_{r-md} = Distancia del nivel de referencia al manómetro en la descarga (m)</p>

1.2.11.3 Formatos de registro de datos en campo

Es importante el uso de formatos de campo organizados para registrar tanto las características del sistema electromecánico de los equipos de bombeo, sus valores nominales y los datos obtenidos en las campañas de medición de los mismos. En la tabla 1.6 se muestra un ejemplo de formato para el registro de las características del sistema electromecánico y los datos nominales tanto

de la bomba como del motor. En la tabla 1.7 se presenta un formato que puede utilizarse para anotar las mediciones de variables hidráulicas y eléctricas de los equipos de bombeo y cálculos para determinar la eficiencia electromecánica, que vienen enunciadas en la NOM-006-ENER-1995 Eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación.- Límites y método de prueba.

Tabla 1.6 Formato para el registro de datos nominales y características del sistema electromecánico

Propietario:				
Domicilio:				
Localización del pozo:				
Parámetros garantizados de la bomba	Tipo: Vertical Sumergible		Marca:	
	No. Pasos:		Flujo (m ³ /s):	
	Carga total (m):		Eficiencia (%):	
Datos de la columna	Diámetro de succión (m):		Diámetro de la flecha (m):	
Datos de placa del motor	Marca:		Eficiencia (%):	Potencia (kW):
	Tensión (V):		Corriente (A):	Frecuencia de rotación (RPM):
Instrumentos de medición	Tipo		Certificado de calibración	
			Exactitud (%)	Expedido por
Flujo				
Presión de descarga				
Nivel dinámico	Sonda eléctrica :			
	Sonda neumática :			
Potencia eléctrica (medición directa)				
Potencia eléctrica medición indirecta	Voltímetro			
	Amperímetro			
	Factorímetro			
Duración de la Prueba	Fecha:		Responsable:	
	Hora de inicio:		Hora de finalización:	

Tabla 1.7 Reporte de pruebas de campo de acuerdo a la NOM 006 ENER 1995

#	Símbolo	Descripción	1	2	3	4
1	Di	Diámetro interno de la tubería (m)				
2	n	Frecuencia de rotación (RPM)				
3	ND	Nivel dinámico (m)				
4	X	Distancia desde el nivel de referencia a la línea de centros del manómetro (m)				
5	P1	Lectura del manómetro a la descarga (m)				
6	Pm	Presión a la descarga = [(4) + (5)] (m)				
7	A	Área del tubo a la descarga = $[3\ 141\ 592 \times (1)^2/4]$ (m ²)				
8	qv	Flujo (m ³ /s)				
9	hv	Carga de velocidad = $[\{(8)/(7)\}^2 / 19\ 613\ 3]$ (m)				
10	hfc	Pérdidas de fricción en la columna (m)				
11	hd	Carga a la descarga = [(6) + (9) + (10)] (m)				
12	H	Carga total = [(3) + (11)] (m)				
13	I _A I _B I _C I	Corriente línea A Corriente línea B Corriente línea C Promedio = $[(I_A + I_B + I_C) / 3]$ (a)				
14	V _{AB} V _{AB} V _{AB} V	Tensión fase AB Tensión fase AC Tensión fase BC Promedio = $[(V_{AB} + V_{AC} + V_{BC}) / 3]$ (v)				
15	FP _A FP _B FP _C FP	Factor de potencia línea A Factor de potencia línea B Factor de potencia línea C Promedio = $[(FP_a + FP_b + FP_c) / 3]$ (%)				
16	Pe	Potencia de entrada al motor = $1\ 732 \times (13) \times (14) \times (15) \times 10^{-5}$ (kW)				
17	Ps	Potencia de salida de la bomba = $[(8) \times (12) \times 9\ 806]$ (kW)				
18	H	Eficiencia electromecánica = $[(17) / (16)] \times 100$ (%)				

1.2.11.4 Elaboración de curvas de operación de equipos de bombeo

Las curvas de operación de los equipos de bombeo permiten contar con dos elementos claves en los análisis de eficiencia en sistemas de agua potable:

- 1) Comparar la situación de operación actual con las condiciones originales de operación de los equipos de bombeo y valorar los niveles de capacidad de producción que ha perdido con el paso del tiempo, lo cual es un reflejo de la pérdida de rendimiento energético respecto a la original.
- 2) Contar con los datos necesarios para alimentar de información al modelo de simulación hidráulica del sistema de agua potable, que es parte del proyecto de eficiencia hidráulica, que se explica en la sección tres del presente Manual.

Las curvas de operación de los equipos de bombeo, que se obtienen como producto de las mediciones eléctricas e hidráulicas, son dos principalmente:

- a) Curva de caudal (Q) vs carga de bombeo (H_b)
- b) Curva de de caudal (Q) vs eficiencia electromecánica del conjunto motor-bomba (η_b)

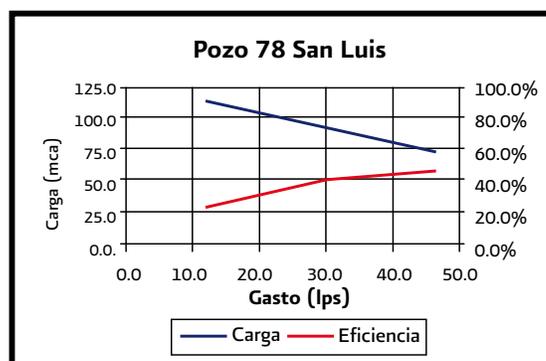
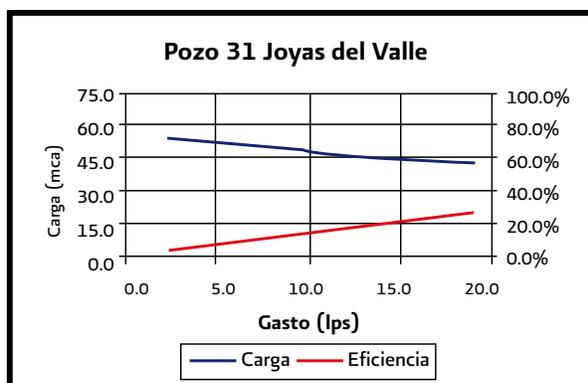
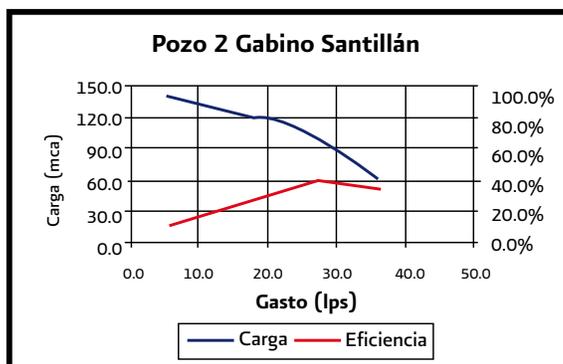
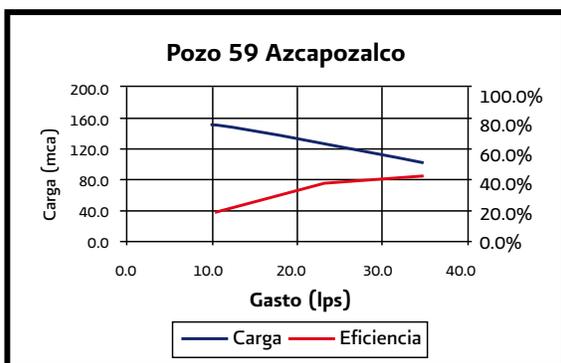
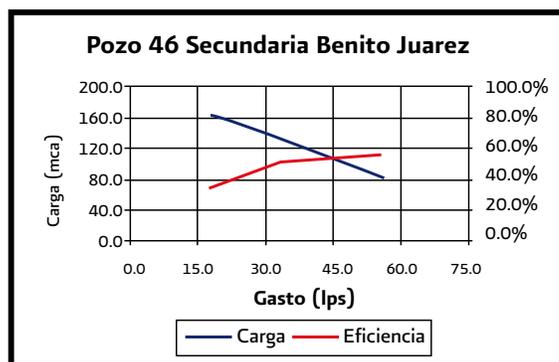
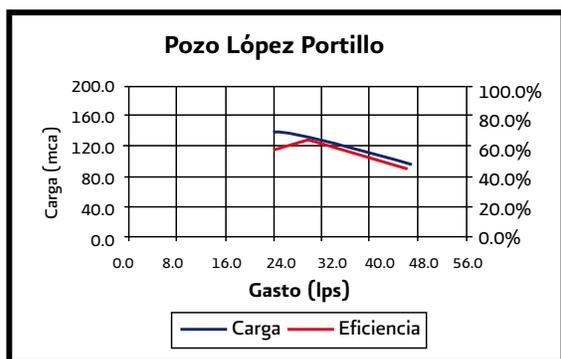
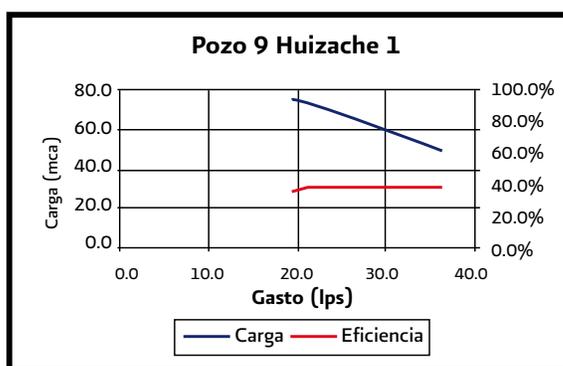
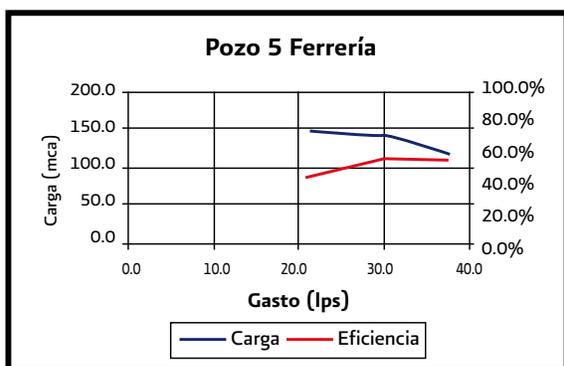
Para construir las curvas $Q-H_b-\eta_b$, es necesario realizar la medición de parámetros hidráulicos y eléctricos en al menos tres a cuatro situaciones de operación de los equipos de bombeo. Para ello, se realiza la modificación de presión de la descarga, estrangulando en un determinado porcentaje la válvula situada aguas abajo de la bomba de manera gradual hasta que se estabilice la nueva condición simulada de operación. De esa manera, se obtienen valores para varias condiciones de funcionamiento, en donde se registran todas las variables eléctricas e hidráulicas que serán procesadas para construir las curvas respectivas.

Un ejemplo del consolidado de mediciones para este fin y el resultado en equipos reales se muestran en la Tabla 1.8 y en la figura 1.23.

Tabla 1.8 Consolidado de mediciones para curvas $Q-H_b-\eta_b$ en un organismo operador

Equipo	Mediciones				Cálculos	
	Gasto (lps)	Presión (kg/cm ²)	Nivel dinámico (m)	Potencia Eléctrica (kW)	Carga (mca)	Eficiencia (%)
Pozo 5 Ferrería	38.0	4.2	75.0	83.0	117.0	52.5%
	31.0	6.2	74.0	75.0	136.0	55.1%
	21.0	7.0	73.5	71.0	143.5	41.6%
Pozo 9 Huizache 1	36.5	0.7	42.0	46.0	49.0	38.1%
	21.8	3.2	42.0	41.0	74.0	38.6%
	19.5	3.4	42.0	40.0	76.0	36.3%
Pozo 24 López Portillo	47.0	2.6	70.0	94.0	96.0	47.1%
	30.0	7.8	58.0	63.0	136.0	63.5%
	24.0	9.0	50.0	57.0	140.0	57.8%
"Pozo 46 Secundaria Benito Juárez"	56.0	3.7	47.0	83.0	84.0	55.6%
	34.0	9.0	44.0	89.0	134.0	50.2%
	18.0	11.8	42.0	81.0	160.0	34.9%
Pozo 59 Azcapotzalco	35.0	0.8	92.0	82.0	100.0	41.9%
	23.0	3.7	90.0	82.0	127.0	34.9%
	10.0	6.2	89.0	80.0	151.0	18.5%
"Pozo 2 Gabino Santillán"	36.5	0.0	59.0	62.0	59.0	34.1%
	27.5	4.3	59.0	69.0	102.0	39.9%
	12.5	7.8	50.0	69.0	128.0	22.7%
	5.5	9.0	50.0	71.0	140.0	10.6%
"Pozo 31 Joyas del Valle"	19.0	0.5	37.0	30.0	42.0	26.1%
	13.0	0.9	35.5	30.0	44.5	18.9%
	2.4	2.2	31.5	32.0	53.5	3.9%
Pozo 78 San Luis	46.5	1.8	54.0	74.0	71.5	44.1%
	31.0	4.0	50.8	71.0	90.8	38.9%
	12.0	7.0	42.0	59.0	112.0	22.3%

Figura 1.23 Curvas reales H-Q en pozos de un organismo operador. (Ejemplo)



Sección 2 Eficiencia física

2.1 Diagnóstico de eficiencia física

La eficiencia física ($\eta_{\text{física}}$) se refiere a la conservación del agua en el sistema de abastecimiento y se calcula en porcentaje (CNA, 2005)⁵, como:

$$\eta_{\text{física}} = \frac{\text{Vol}_{\text{consumido}}}{\text{Vol}_{\text{suministrado}}} \times 100 \quad (2.1)$$

El volumen consumido ($\text{Vol}_{\text{consumido}}$) es la cantidad de agua, medida o no (cuota fija), que reciben los usuarios en sus tomas, estén o no registradas por el Organismo Operador. El volumen suministrado ($\text{Vol}_{\text{suministrado}}$) es la cantidad de agua producida o extraída de las fuentes de abastecimiento.

El volumen consumido ($\text{Vol}_{\text{consumido}}$) corresponde al vo-

lumen facturado que se reporta comúnmente en los datos en el Sistema Comercial en los Organismos Operadores.

La eficiencia física determinada con la ecuación 2.1 refleja en buena medida la capacidad que tiene un sistema de abastecimiento para entregar el agua inyectada a la red hasta los usuarios y la magnitud del volumen de las fugas existentes. Sin embargo, el valor de la eficiencia física no manifiesta de manera exacta el nivel de deterioro de las tuberías, tomas domiciliarias y otros elementos del sistema.

Por esta razón, recientemente se promueve la aplicación de indicadores relativos, que dependen de la longitud, la presión media, el tiempo de servicio y el número de tomas domiciliarias que tiene la red de distribución. La *International Water Association* (IWA) recomienda la utilización del Indicador de Fugas Estructural (IFE) que se calcula mediante la ecuación 2.2.

$$\text{IFE} = \frac{\text{VIF}}{\text{UMF}} = \frac{n_t \frac{\text{Vol}_{\text{if}}}{t n_t}}{\left(A \text{Long}_r + B n_t + C \text{Long}_t \right) P_{\text{med}}} = \frac{\text{Vol}_{\text{if}}}{d \left(A \text{Long}_r + B n_t + C \text{Long}_t \right) P_{\text{med}}} \quad (2.2)$$

⁵ Comisión Nacional del Agua, 2008, "Programa de Seguimiento de Indicadores de Gestión para Cumplimiento de meta de Eficiencia Global. Manual de Indicadores", Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, México.

Donde:

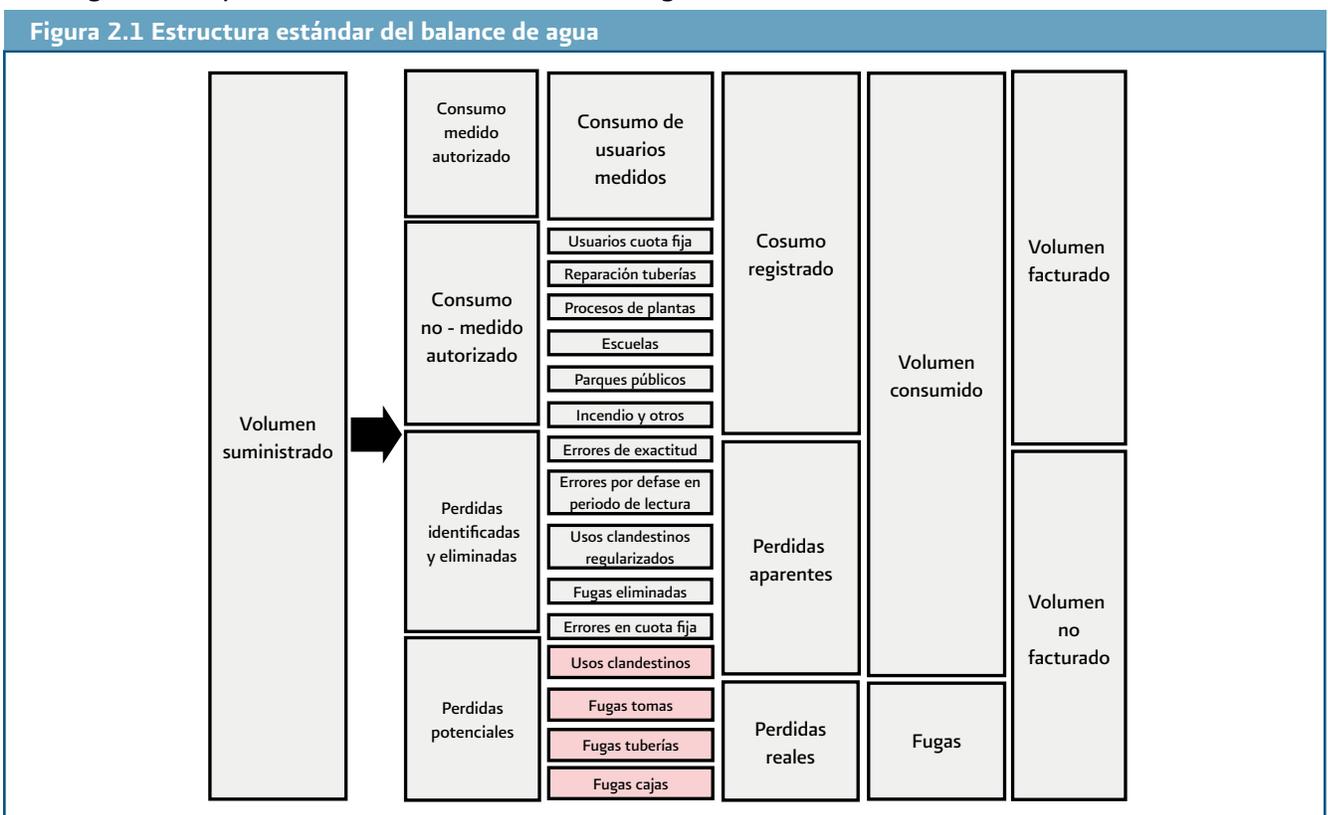
- VIF = Indicador del volumen de fugas ($m^3/toma/día$)
- UMF = Umbral mínimo de fugas (referencia óptima) ($m^3/toma/día$)
- Vol_{if} = Volumen de fugas en el sistema (m^3)
- t = Tiempo de operación del sistema (días)
- n_t = Número total de tomas domiciliarias registradas
- A, B y C = Constantes que ponderan la variable que acompañan y que han sido determinadas con un análisis estadístico de 20 países⁶; A=18, B=0.8, C=25
- $Long_r$ = Longitud total de las tuberías de la red de distribución (km)
- $Long_t$ = Suma de las longitudes de todas las tomas domiciliarias (km)
- p_{med} = Carga de presión media en la red de distribución (m.c.a.)

Un valor del IFE igual a uno, deberá ser interpretado como el estado físico óptimo deseable en una red de abastecimiento. En la medida en que este valor se incrementa, se interpreta que la red se encuentra más deteriorada.

El objetivo del diagnóstico de eficiencia física es precisamente determinar los valores del indicador de eficiencia de la ecuación 2.1 y del Indicador de Fugas Estructural (IFE) de la ecuación 2.2, e identificar y cuantificar las pérdidas reales o fugas, así como proporcionar las bases para la elaboración de un proyecto de incremento de la eficiencia física del sistema, cuyo desarrollo se presenta en la sección 2.2 de este Manual.

El diagnóstico de la eficiencia física de un sistema de agua potable se elabora con base en el Balance de Agua, que es una técnica para auditar detalladamente la forma de administrar el suministro y el consumo de agua de un sistema de agua potable y discriminar las pérdidas reales de las aparentes.

En la figura 2.1 se presenta la estructura del balance de agua⁷.



⁶ Wallace, 1987, "Water and Revenue Losses: Unaccounted for Water", AWWA, Research Report Foundation.

⁷ Ochoa Alejo L. y Reyes Medel L., 2008, "Generación y corrección de información para la conformación de balances de agua en sistemas de distribución de agua potable", Memorias del XX Congreso Nacional de Hidráulica, AMH, Toluca, México.

Para efectos de aplicación, el balance de agua está dividido en tres fases, que contienen varias tareas, actividades de análisis y cálculos, los cuales se esquematizan en la figura 2.2.

Figura 2.2 Fases, actividades y tareas del balance de agua

Fase I
A. Establecer hoja de cálculo
B. Definir periodo de análisis
C. Elegir unidad de medida
Fase II
Tarea1. Cuantificación del suministro de agua
Tarea2. Estimación de consumos medidos autorizados
Tarea3. Estimación de consumos no medidos autorizados
Tarea4. Cálculo de pérdidas identificadas y eliminadas
Tarea5. Estimación de pérdidas potenciales totales
Fase III
A. Identificar pérdidas reducibles y acciones
B. Determinar los beneficios de la reducción de pérdidas
C. Calcular costos y tiempo de reducción de pérdidas

Enseguida se presenta una descripción de los procedimientos que deben seguirse para elaborar un balance de agua potable, según las fases I, II y III y las tareas mencionadas.

2.1.1 Hoja de cálculo, periodo de análisis y unidad de medida

En el anexo C de este Manual se muestra un formato de cálculo, que puede utilizarse para facilitar la aplicación del balance de agua.

Este balance de agua se aplica en un periodo específico, de acuerdo con la disponibilidad de estadísticas históricas del organismo operador. Lo común y más confiable es realizar el balance de agua con los datos del último año de registro; sin embargo, en ocasiones no hay suficiente información, por lo que puede realizarse en periodos menores, hasta de un mes, pero con la advertencia de que los resultados serán menos exactos.

Se recomienda utilizar y convertir todos los datos para el cálculo en metros cúbicos (m³).

2.1.2 Tarea 1 Cuantificación del suministro de agua

Primero se identifican las fuentes de agua y obras de captación del sistema de abastecimiento, pozos, galerías, manantiales, estaciones de bombeo, tanques de regulación y almacenamiento, etc. El análisis de esta información se facilita si se construye un croquis de localización sobre el plano de la ciudad.

Después se coleccionan, revisan y ordenan los registros históricos de volúmenes de agua producida, por mes y por cada una de las captaciones, utilizando un cuadro similar al presentado en la tabla 2.1, y en donde las celdas amarillas indican los datos capturados y las celdas verdes los valores que deberán ser calculados.

Tabla 2.1 Ejemplo de volúmenes de agua producida en un sistema de abastecimiento urbano

Captacion con macromedidor funcionando						
Mes	Pozo 1	Pozo 2	Pozo 3	...	Pozo n	Total
Enero	327 734	629 262	646 117			1 603 113
Febrero	299 335	516 608	637 338			1 453 281
Marzo	333 249	603 436	777 520			1 714 205
Abril	311 892	609 729	672 399			1 594 020
Mayo	315 896	565 540	783 896			1 665 332
Junio	297 541	532 259	715 818			1 545 618
Julio	303 185	479 046	762 757			1 544 988
Agosto	297 757	540 910	760 955			1 599 622
Septiembre	296 541	551 421	677 010			1 524 972
Octubre	288 283	597 929	602 986			1 489 198
Noviembre	293 294	445 265	688 173			1 426 732
Diciembre	302 902	488 629	723 927			1 515 458
Total	3 667 609	6 560 034	8 448 896	0	0	18 676 539

Estas cantidades se consideran volúmenes no-corregidos de agua suministrada en el periodo, puesto que existen factores que ocasionan errores en los registros, por ejemplo:

- Macromedidores inexactos.
- Cambios en el volumen de almacenamiento en los tanques de regulación.
- Captaciones sin medidor.
- Fugas antes del punto de entrega a la red de distribución.
- Entregas en ruta a usuarios no registrados, como ejidos, etc.

El volumen total corregido de agua suministrada es igual a la sumatoria de ajustes parciales por error de macromedición, almacenamiento en tanques, fugas, captaciones sin medidor o sin registros, etc.

2.1.2.1 Volúmenes de producción no-registrados

En fuentes que no cuenten con equipo de medición o sin registros históricos, se deben realizar mediciones puntuales y estimar los volúmenes producidos en el periodo del balance. La medición se realizará según las especificaciones y recomendaciones señaladas en las secciones 1.2.2 y 1.2.3 de este Manual.

La fórmula para calcular la estimación del volumen producido (en m³) en cada captación es la siguiente:

$$Vol_{estap} = \sum_{i=1}^m 86.4 * Q_{mi} * \left(\frac{t_{OAi}}{24} \right) Per_{bal}$$

(2.3)

Donde:

Vol_{estap} = Volumen estimado total de agua producida ($m^3/año$)

Q_m = Caudal medio registrado en el equipo portátil (l/s)
 t_{OA} = Tiempo de operación anual de la captación (h/año)

Per_{bal} = Periodo de análisis del balance (días)

i = Captación en turno

m = Número total de captaciones en el sistema de agua potable

$$Vol_A = \sum_{j=1}^{mt} Vol_{it} * Vol_{ft} \quad (2.4)$$

Donde:

Vol_A = Volumen de ajuste por almacenamiento (m^3)

Vol_{it} = Volumen inicial en el tanque j (m^3)

Vol_{ft} = Volumen final en el tanque j (m^3)

mt = Número total de tanques en el sistema de agua potable

2.1.2.2 Corrección de volúmenes de producción por inexactitud de macromedidores instalados

Para ajustar el volumen de producción por error de macromedición se debe determinar el error de los equipos de medición instalados y con registros históricos siguiendo el procedimiento de la sección 1.2.4 del Manual.

2.1.2.3 Corrección de volúmenes de producción por cambio en los volúmenes de almacenamiento en tanques

Se deben detectar cambios en los volúmenes de almacenamiento de los tanques de regulación, los cuales se calculan con la fórmula 2.4.

2.1.3 Tarea 2 Estimación de consumos medidos autorizados

Esta actividad consiste en determinar cuánta agua consumieron los usuarios que cuentan con medidor domiciliario, sean domésticos, comerciales, industriales y especiales, a los que se les hace lectura con una frecuencia determinada y están registrados en el padrón de usuarios con sus estadísticas de volumen consumido.

El volumen mensual medido y autorizado total por tipo de uso se registra en una tabla como la mostrada en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Ejemplo de consumos medidos autorizados sin corregir (m^3)

Mes	Tipo de uso					Total
	Doméstico	Comercial	Servicios públicos	Industrial	Hotelero	
enero	402 045	23 952	31 512	0	9 225	466 734
Febrero	406 576	23 736	31 578	0	9 082	470 972
Marzo	413 682	22 877	30 463	0	6 659	473 681
Abril	449 150	25 588	33 973	0	7 083	515 794
Mayo	418 240	22 116	27 923	0	6 777	475 056
Junio	433 748	22 143	30 390	0	6 570	492 851
Julio	420 535	22 208	32 434	0	6 942	482 119
Agosto	412 723	21 218	29 885	0	6 662	470 488
Septiembre	435 732	22 327	33 964	0	7 032	499 055
Octubre	410 500	20 469	34 814	0	6 245	472 028
Noviembre	426 235	22 337	30 957	0	6 628	486 157
Diciembre	387 148	19 518	31 728	0	5 751	444 145
Total	5 016 314	268 489	379 621	0	84 656	5 749 080

Estos valores de consumos medidos autorizados pueden tener errores de lectura o exactitud de los micromedidores durante el proceso de registro, por lo que deben ser considerados como consumos medidos autorizados sin corregir.

2.1.4 Tarea 3 Estimación de consumos no-medidos autorizados

Debido a que es muy común encontrar tomas domiciliarias autorizadas por el organismo operador que no cuentan con micromedidor, es necesario estimar el volumen de agua consumido por estos usuarios para considerarlo en el balance de agua del sistema.

A estas tomas domiciliarias sin micromedidor normalmente se les aplica un volumen fijo de consumo mensual, que es determinado por el propio organismo con base en sus estadísticas, experiencias o pruebas de campo. Para el análisis del balance de agua, estos consumos asignados a los usuarios con cuota fija se cuantifican y se registran por mes y tipo de usuario como se muestra en la tabla 2.3.

Hay que tener en cuenta que estos valores de consumo de cuota fija pueden perder exactitud si no han sido actualizados por el organismo operador, por lo que deberá calcularse este error como se describe en la sección 1.2.5 de este Manual.

Además de los volúmenes de usuarios con cuota fija, existen otros consumos de agua sin medición que están autorizados por el organismo operador, como por ejemplo:

- a) Vaciados en las reparaciones de tuberías.
- b) Agua utilizada en los procesos de potabilización y tratamiento.
- c) Riego de áreas verdes públicas.
- d) Agua para combatir incendios.

Estos volúmenes de consumo de agua no medidos y autorizados deberán en lo posible ser cuantificados en el mismo periodo de análisis del balance de agua con el fin de afinar los resultados de las pérdidas potenciales de agua en el sistema. El procedimiento de cálculo a detalle sugerido se puede consultar en el libro "Reducción Integral de Pérdidas de Agua Potable"⁸. De cualquier manera, en el formato del balance de agua incluido en el anexo de este Manual, se incluyen los cuadros de cálculo correspondientes.

Tabla 2.3 Ejemplo de consumos de usuarios con cuota fija

Mes	Tipo de uso						Total
	Doméstico	Comercial	Servicios públicos	Industrial	Hotelero	Otros	
enero	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Febrero	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Marzo	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Abril	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Mayo	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Junio	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Julio	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Agosto	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Septiembre	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Octubre	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Noviembre	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Diciembre	125 400	7 300	10 200		2 924		145 824
Total	1 504 800	87 600	122 400	0	35 088	0	1 749 888

⁸ Ochoa A.L. y Bourguett, O.V., 1998, "Reducción Integral de Pérdidas de Agua Potable", Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA, Jiutepec, Morelos, México.

2.1.5 Tarea 4 Cálculo de pérdidas identificadas y eliminadas

Antes de determinar el valor de las pérdidas potenciales del sistema de agua potable, es decir, los volúmenes de fugas y usos clandestinos que permanecen latentes en la red de distribución de agua, es necesario estimar algunas pérdidas de agua que son fácilmente identificables en el periodo de análisis del balance de agua. Estas pérdidas de agua identificables son:

- Consumo de agua por errores de exactitud en los micromedidores.
- Consumo de agua por desfase en periodos de lectura de medidores.
- Consumo de agua de usuarios fraudulentos y clandestinos regularizados.
- Volumen de fugas reparadas.
- Consumo de agua por errores en asignación de cuotas fijas.

Hay otras pérdidas identificables, tales como derrames en tanques y cárcamos de bombeo, evaporación en depósitos abiertos, y consumo de agua por errores en el proceso contable que, si existen datos estadísticos en el

organismo operador, pueden estimarse para tener mayor precisión en el balance de agua.

Los valores de estas pérdidas de agua potable deben sumarse o restarse, según sea el caso, al volumen de agua suministrada al sistema de distribución, por lo que enseña se describen los procedimientos para estimarlos.

2.1.5.1 Consumo de agua por errores de exactitud en los micromedidores

El error de exactitud de micromedidores se determina mediante un muestreo de campo con el procedimiento indicado en la sección 1.2.6 de este Manual. Es recomendable determinar el error por modelo o marca del micromedidor, siempre y cuando se disponga de estadísticas o se puedan calcular los consumos mensuales asociados a estas marcas o modelos. En la práctica, para la realización del balance de agua, por lo general basta con realizar un muestreo para usuarios domésticos y otro para grandes usuarios (comerciales, industriales, mixtos y especiales).

El consumo de agua por errores de exactitud en micromedidores (volumen de ajuste) se estima entonces con la ecuación 2.5.

$$\text{Volumen de ajuste} = \left(1 + \frac{\text{volumen de consumo medio SIN corregir}}{\frac{\text{Error de exactitud del micromedidor (\%)}}{100}} \right) - \text{volumen de consumo medio SIN corregir}$$

(2.5)



2.1.5.2 Consumo de agua por desfase en periodos de lectura de medidores

Es común que el periodo utilizado en el balance de agua no coincida exactamente con las fechas de toma de lecturas de micromedidores y/o macromedidores. El ajuste de consumo de agua por este desfase se realiza con las fórmulas 2.6 a 2.8.

$$\text{Vol}_{ip} = \text{Vol}_{map} \frac{D_{tl}}{nD_{map}} \quad (2.6)$$

Donde:

Vol_{ip} = Volumen de consumo de agua ajustado para el inicio del periodo (m^3)

Vol_{map} = Volumen de consumo de agua contabilizado en el mes anterior al periodo (m^3)

D_{tl} = Día del mes de la toma de lecturas (día)

nD_{map} = Número de días del mes anterior al periodo (días)

$$\text{Vol}_{fp} = \text{Vol}_{ump} \frac{nD_{ump} - D_{tl}}{nD_{ump}} \quad (2.7)$$

Donde:

Vol_{fp} = Volumen de consumo de agua ajustado para el final del periodo (m^3)

Vol_{ump} = Volumen de consumo de agua contabilizado en el último mes del periodo (m^3)

nD_{ump} = Número de días del último mes del periodo (días)

$$\text{Vol}_t = \text{Vol}_{ip} + \text{Vol}_{fp} - \text{Vol}_{ump} \quad (2.8)$$

Donde:

Vol_t = Volumen de consumo de agua ajustado total (m^3)

2.1.5.3 Consumo de agua de usuarios fraudulentos y clandestinos regularizados

En la categoría de usuarios fraudulentos y clandestinos se encuentran las tomas domiciliarias detectadas con las siguientes características:

a) Arreglos o conexiones autorizadas que evitan la medición y registro real del volumen de agua consumido.

- b) Conexiones hechas directamente por los usuarios sin autorización ni registro por parte del organismo operador.
- c) Conexiones registradas en el padrón de usuarios con usos distintos al uso real.

El volumen de agua consumida por estos usuarios, antes de ser detectado y regularizado, representa una pérdida identificada y eliminada cuyo volumen debe estimarse de la siguiente manera:

- 1) Restar primero al consumo promedio estimado en la zona socioeconómica donde se detectó el fraude, el consumo promedio en la toma fraudulenta antes de sus detección (muchas veces es igual a cero, toma no registrada o clandestina).
- 2) El resultado de la resta se multiplica por el número de meses que estuvo funcionando en estado fraudulento.
- 3) El resultado se multiplica por el número de tomas del mismo tipo de uso localizadas y regularizadas.
- 4) Esta estimación se realiza por separado para todos los usos y zonas socioeconómicas.

En la tabla 2.4 se muestra un ejemplo de la forma de registrar estos volúmenes de pérdidas identificadas por usos fraudulentos y clandestinos regularizados.

Tabla 2.4 Ejemplo de pérdidas por usos y fraudulentos y clandestinos regularizados

Zona Socioeconómica	No. Conexiones descubiertas	Consumo promedio antes de su detección (m ³ /mes)	Consumo promedio de la zona (m ³ /mes)	No. Meses que estuvieron ocultas	Volumen de agua por usos clandestinos regularizados (m ³)
Popular	27	6	19	6	2 106
Media	34	7	30	6	4 692
Residencial	12	0	45	6	3 240
Comercial	5	9	70	6	1 830
Industrial	1	0	920	2	1 840
Otros servicios	0				0
				Total	13 708

2.1.5.4 Volumen de fugas reparadas

Durante el periodo de análisis del balance de agua seguramente se repararon fugas, cuyo volumen debe ser estimado para descontarlo del volumen suministrado a la red de distribución. El volumen de fugas reparadas se calcula multiplicando su caudal unitario promedio por el número de fugas reparadas y por el tiempo que permanecieron sin repararse. En caso de que los reportes de las fugas reparadas en el periodo no cuenten con registros de aforos, el caudal unitario promedio de fugas se puede obtener en forma aproximada aforando todas las fugas reparadas por el organismo operador en un lapso de tres a cuatro semanas.

Para facilitar la cuantificación del volumen de agua de las fugas ocurridas en el periodo del balance, es recomendable clasificarlas en fugas ocurridas en tomas domiciliarias, en tuberías de conducción y distribución y en cajas de válvulas.

Adicionalmente y para realizar una mejor estimación de volúmenes de fugas reparadas en el periodo del balance de agua, los tipos de fugas arriba mencionados se subdividen de acuerdo a los puntos y zonas de ocurrencia. Por ejemplo, las fugas en tomas domiciliarias se sub-

dividen por zonas de presión, considerando la presión media de operación (en kg/cm²); las fugas en la red se subdividen de acuerdo a los diámetros de las tuberías donde ocurren; y las fugas en cajas de válvulas se subdividen en la pieza de ocurrencia (estopero, junta, otros). Para cada una de estas subdivisiones se estima el volumen de agua pérdida con la fórmula 2.9. El registro de estas estimaciones puede concentrarse como se muestra en la tabla 2.5.

$$Vol_{fr} = n_f * Q_f * t_f * 0.0864 \quad (2.9)$$

Donde:

- Vol_{fr} = Volumen de fugas reparadas (m³)
- n_f = Número de fugas reparadas
- Q_f = Caudal promedio de fugas (mmL/s)
- t_f = Tiempo promedio de permanencia de las fugas, desde el inicio del periodo del balance de agua hasta ser reparada (días)

0.0864 = Coeficiente de conversión de mmL/s a m³

Tabla 2.5 Ejemplo de fugas identificadas y eliminadas

Fugas identificadas y reparadas				
Fugas en tomas domiciliarias				
Zona de presión de la ciudad (kg/cm ²)	No. Fugas reparadas	Gasto promedio de fuga (mmL/s)	Tiempo que existió la fuga (días)	Volumen de agua perdida (m ³)
0 - 1	440	35	7	9 314
1.1 - 2	532	60	3	8 274
2.1 - 3	0			0
3.1 - 4	0			0
más de 4	0			0
Total				17 588

Fugas en tuberías principales y secundarias				
Diámetro del tubo (pulgadas)	No. Fugas reparadas	Gasto promedio de fuga (mmL/s)	Tiempo que existió la fuga (días)	Volumen de agua perdida (m ³)
3, 4 y 6	46	255	5	5 067
8 y 10	24	312	3	1 941
12 a 20	15	714	2	1 851
más de 20	8	1 250	2	1 728
Total				10 587

Fugas en cajas de válvulas				
Tipo de fuga	No. Fugas reparadas	Gasto promedio de fuga (mmL/s)	Tiempo que existió la fuga (días)	Volumen de agua perdida (m ³)
Estopero	0			0
Junta	0			0
Otro	0			0
Total				0

2.1.5.5 Consumo de agua por errores en asignación de cuotas fijas

Estas pérdidas se detectan comparando las cuotas fijas asignadas (consumos unitarios asignados) para cada tipo de usuario con los consumos unitarios reales, valorados de acuerdo a los procedimientos señalados en la sección 1.2.5 de este Manual.

El padrón de usuarios con cuota fija debe subclasificarse por tipos de usuario (doméstico, comercial, industrial, mixto, servicios públicos y otros) y para cada uno se comparan los consumos unitarios asignados y valorados. El consumo de agua por errores en asignación de cuotas fijas se determina con las fórmulas 2.10 y 2.11.

$$Err_{Cucf} = \frac{Cu_A - Cu_V}{Cu_V} * 100 \quad (2.10)$$

Donde:

- Err_{Cu} = Error de consumo unitario en cuota fija (±%)
- Cu_A = Consumo unitario de cuota fija asignado (m³/mes)
- Cu_V = Consumo unitario de cuota fija valorado (m³/mes)

$$C_{ECF} = \frac{Vol_{ucf}}{1 + \%Err_{Cucf}/100} - Vol_{ucf} \quad (2.11)$$

Donde:

- C_{ECF} = Consumo de agua por error de cuota fija en el periodo del balance de agua (± m³)
- Vol_{ucf} = Volumen de consumo de agua de usuarios con cuota fija en el periodo del balance de agua sin corregir (m³)
- Err_{Cucf} = Error de consumo unitario en cuota fija (± %)

2.1.6 Tarea 5 Estimación de pérdidas potenciales totales

El volumen de pérdidas potenciales totales es al agua que ha sido suministrada a la red de distribución y que, por un lado se desperdicia en fugas permanentes que no han sido detectadas y, por otro, en agua que es consumida por los usuarios pero que el organismo operador no tiene control de ella.

Este volumen de pérdidas potenciales totales en el periodo de análisis del balance de agua se obtiene con la expresión 2.12.

$$Vol_{epp} = Vol_{sumacorr} - Vol_{masc} - Vol_{nma} - Vol_{peridel} \quad (2.12)$$

Dónde:

- Vol_{epp} = Volumen estimado de pérdidas potenciales totales (m³)
- Vol_{sumacorr} = Volumen de suministro total de agua corregido (m³)

- Vol_{masc} = Volumen consumido medido total autorizado sin corregir (m^3)
- Vol_{nma} = Volumen consumido total no medido autorizado (m^3)
- $Vol_{peridel}$ = Volumen de pérdidas totales identificadas y eliminadas (m^3)

Como puede observarse en esta expresión, las pérdidas potenciales totales representan el volumen de agua que ingresa al sistema de distribución pero cuyo destino y uso final se desconoce.

Para efectos de estimación de pérdidas totales en el sistema de abastecimiento basta con este cálculo; sin embargo, si se desea discriminar cuánto volumen de esta agua corresponde a fugas (pérdidas reales) y cuánta a usos no controlados (pérdidas aparentes), es necesario utilizar los procedimientos indicados en la sección 1.2.7 de este Manual (estimación del volumen de fugas en tomas domiciliarias y cajas de válvulas). De igual manera, con los resultados de la vinculación de tomas domiciliarias, señalado en la sección 1.2.10 del Manual, se puede estimar el potencial de pérdidas aparentes en el sistema. El resto del volumen de agua corresponderá a las fugas en tuberías principales y secundarias.

Con todos estos resultados se calcula el indicador de eficiencia física del sistema de abastecimiento de agua potable, utilizando la ecuación 2.1, que con las variables estimadas con el balance de agua, queda como se muestra en la ecuación 2.13.

$$\eta_{física} = 1 - (Vol_{eprp} / Vol_{sumacorr}) \quad (2.13)$$

Donde:

- $\eta_{física}$ = Eficiencia física del sistema de abastecimiento de agua potable (%)
- Vol_{eprp} = Volumen estimado de pérdidas reales potenciales (fugas) (m^3)
- $Vol_{sumacorr}$ = Volumen de suministro total de agua corregido (m^3)

Es importante conocer este indicador para definir las acciones de reducción y control de fugas. Se considera que valores cercanos al 15% reflejan sistemas de agua potable sin problemas de fugas significantes, por lo que solamente

deberán mejorar sus acciones de control. En cambio, si el indicador rebasa el 20% es necesario realizar acciones de eliminación y control de fugas de manera inmediata.

2.1.7 Pérdidas reducibles y acciones

No todas las pérdidas reales potenciales se pueden detectar y reducir, pues siempre existirá un grupo de fugas (llamadas fugas latentes) imperceptibles a los aparatos de detección, o bien, que su localización no es rentable. Internacionalmente este porcentaje límite es considerado del orden de 15% del volumen de agua total suministrado corregido; no obstante, con base en las condiciones actuales de los sistemas de agua potable y en la experiencia de organismos operadores de México, que han realizado acciones de reducción de fugas, lo factible y viable es lograr un porcentaje del 20%. Sin embargo, siempre será mejor realizar un análisis para encontrar el punto de equilibrio económico de la reducción de pérdidas⁹.

En el caso de las pérdidas aparentes, su regularización puede alcanzar el 100% con un adecuado programa de trabajo sobre actualización del padrón de usuarios y con un sistema de facturación efectivo.

En consistencia, los ahorros de agua y energía simultáneos se obtienen al reducir los volúmenes de fugas. El agua de fugas reparadas se deja de bombear y al eliminar fugas se tiene menor carga dinámica de bombeo. En cambio, las pérdidas aparentes por uso clandestino y fraudes, representan un problema de tipo administrativo y legal para el organismo operador del sistema de agua, pero estos usuarios irregulares no dejarán de consumir agua después de ser identificados e incorporados a la facturación.

Por lo tanto, de aquí en adelante serán consideradas únicamente las acciones de reducción de fugas en la evaluación de costos y beneficios.

Entonces, el volumen total de fugas reducible se calcula con la ecuación 2.14.

$$Vol_{fr20\%} = Vol_{fat} - Vol_{fpl} = Vol_{fat} - 0.2 * Vol_{sumacorr} \quad (2.14)$$

Donde:

- $Vol_{fr20\%}$ = Volumen de fugas reducibles al 20% (m^3)
- Vol_{fat} = Volumen actual de fugas potencial total (m^3)

⁹ Ochoa L., 2005, "Planeación de acciones de incremento y control de la eficiencia en sistemas de agua potable", Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana, CONAGUA, México.

Vol_{fpl} = Volumen de fugas que permanecerán latentes (m^3)

$Vol_{sumacorr}$ = Volumen de suministro total de agua corregido (m^3)

En la tabla 2.6 se presenta un cuadro resumen de pérdidas reducibles clasificadas en fugas de tuberías, tomas domiciliarias y cajas de válvulas.

Una vez definido el volumen de fugas, se programan las acciones de eliminación y control de fugas, de acuerdo con los criterios establecidos en el proyecto de eficiencia física descrito en la sección dos del Manual.

2.1.8.1 Beneficios por ahorro de energía eléctrica por reducción de fugas

Los beneficios por ahorro de energía eléctrica se deben a dos factores: uno debido al ahorro de agua que deja de suministrarse y el otro por la reducción de la carga dinámica en los equipos de bombeo.

Para obtener el ahorro de kilowatts -hora por ahorro de agua se debe estimar primero el número de kilowatts-hora que se consumen en el sistema de agua potable en promedio por cada metro cúbico suministrado (ver la sección seis del Manual). Al multiplicar este valor por el precio del

Tabla 2.6 Ejemplo del cálculo de volúmenes de fugas reducibles

Volumen de fugas reducible para alcanzar el 20% del volumen de suministro				
Porcentaje límite a reducir (%) =			20.00%	
Suministro de agua corregido (m^3) =			18 449.483	
Volumen de fugas reales potenciales totales (m^3)	Porcentaje de volumen de fugas respecto del suministro de agua (%)	Volumen de fugas por reducir para alcanzar el 20% del volumen suministrado (m^3) (*)	Volumen de fugas latentes (m^3)	Porcentaje de volumen de fugas latentes respecto a suministro (%)
7 243.733	39.26%	4 401.816	2 841.917	15.40%
2 161.407	11.72%	1 313.427	847.980	4.60%
0	0.0%	0	0	0.00%
0	0.0%	0	0	0.00%
9 405.140	50.98%	5 715.243	3 689.897	20.00%

(*) Nota: El volumen de fugas por reducir en cada tipo de fuga se obtuvo en forma proporcional al total

2.1.8 Beneficios de la reducción de fugas

El mayor beneficio directo al reducir las fugas es el ahorro en costos de producción y distribución de agua, principalmente de energía eléctrica y potabilización.

Los beneficios indirectos al reducir fugas se vinculan al ahorro en costos por:

- Desfase en construcción de nueva infraestructura de agua y energía eléctrica.
- Disminución del deterioro de infraestructura existente.
- Reducción del mantenimiento excesivo.

Existen otros beneficios que impactan en la eficiencia del servicio de agua, como la conservación de fuentes de abastecimiento locales, menores emisiones de CO_2 , mejor imagen institucional, incremento en la continuidad y cobertura del servicio, aumento en la calidad del agua entregada a usuarios, y mayor disponibilidad en cantidad y presión.

kilowatt-hora y por el volumen de fugas reducibles, se obtiene el beneficio esperado en ahorro de energía eléctrica por la reparación de fugas. Estos resultados se pueden obtener utilizando el formato de cálculo de la tabla 2.7.

Tabla 2.7 Cálculo de beneficios de reducción de fugas en el ahorro de energía eléctrica

Beneficios por costos ahorrados en energía eléctrica por ahorro de agua de fugas reparadas			
Kilowatts-hora unitario de energía eléctrica en la producción de agua (KW-h/m ³) =			0.4
Costo del Kilowatt-hora promedio (\$) =		1.05	
Tipo de fuga	Agua de fugas reducibles (m ³)	Número de Kilowatts- hora ahorrados	Costo de energía eléctrica ahorrada por reducción de agua de fugas (\$)
Tomas domiciliarias	4 401.816	1 760.726	1 848.763
Tuberías	1 313.427	525.371	551.639
Cajas de válvulas	0	0	0
Otras fugas	0	0	0
Total	5 715.243	2 286.097	2 400.402

El ahorro de energía eléctrica debido a la disminución de la carga dinámica de bombeo, se determina utilizando un modelo de simulación hidráulica. Se recomienda utilizar programas que tengan licencia libre y sean amigables: el más usual es el llamado Epanet V 2.0 en español, cuyo ambiente es en Windows y compatible con AutoCad; y uno alternativo es el llamado AH, creado por la Comisión Nacional del Agua cuyo ambiente es en MS2, pero su uso es sencillo. Con estos modelos de simulación hidráulica de redes de distribución se obtienen las cargas dinámicas de bombeo con y sin fugas, de tal manera que las diferencias definirán el ahorro de carga dinámica efectiva. También, con los resultados se calcula la potencia en kilowatts-hora de los equipos de bombeo, igualmente con y sin fugas, para obtener con la diferencia, el ahorro de energía eléctrica. Al multiplicar este valor por el costo promedio de kilowatt-hora, se obtienen los beneficios económicos respectivos.

2.1.8.2 Beneficios por ahorro de potabilización por reducción de fugas

Los beneficios en la potabilización del agua suministrada al sistema de distribución, por la disminución de fugas, se calcula utilizando los datos de las proporciones de sustancias químicas adicionadas al agua en su proceso de tratamiento.

2.1.9 Costo y tiempo de la reducción y control de fugas

Los costos de la reducción y control de fugas se deben calcular con base en las estadísticas propias del organismo operador. Se requiere conocer los siguientes datos sobre fugas en tomas domiciliarias, cajas de válvulas y tuberías:

- Caudal unitario de fugas (l/s/fuga)
- Costo unitario de reparación (\$/fuga)
- Volumen total de agua de fugas por reducir para alcanzar el 20% (m³) (sección 2.1.7)

Primero se estima el número de fugas por reparar en tomas domiciliarias, cajas de válvulas y tuberías dividiendo el volumen respectivo entre el caudal unitario de fuga. Luego se multiplica este número por su costo correspondiente. El costo total de la reducción de fugas para alcanzar el 20% de fugas latentes se calcula sumando los tres costos anteriores.

Es importante mencionar que además de los costos de eliminación o reducción, deberá considerarse el costo derivado del programa de control de fugas que debe implementar permanentemente el organismo operador para mantener los niveles de fugas logrados.

El valor aproximado de este programa de control de fugas puede determinarse considerando que aproximadamente tiene un costo anual de 35 pesos por cada toma registrada.

Las acciones de reducción de fugas deberán realizarse en periodos relativamente cortos, del orden de uno o dos años como máximo, mientras que el control de fugas debe realizarse de manera permanente.

2.2 Proyecto de eficiencia física

Un proyecto de eficiencia física consiste en diseñar e implementar elementos de eliminación y control de fugas, enmarcados en un programa estratégico de acciones para incrementar la eficiencia el funcionamiento del sistema de agua potable.

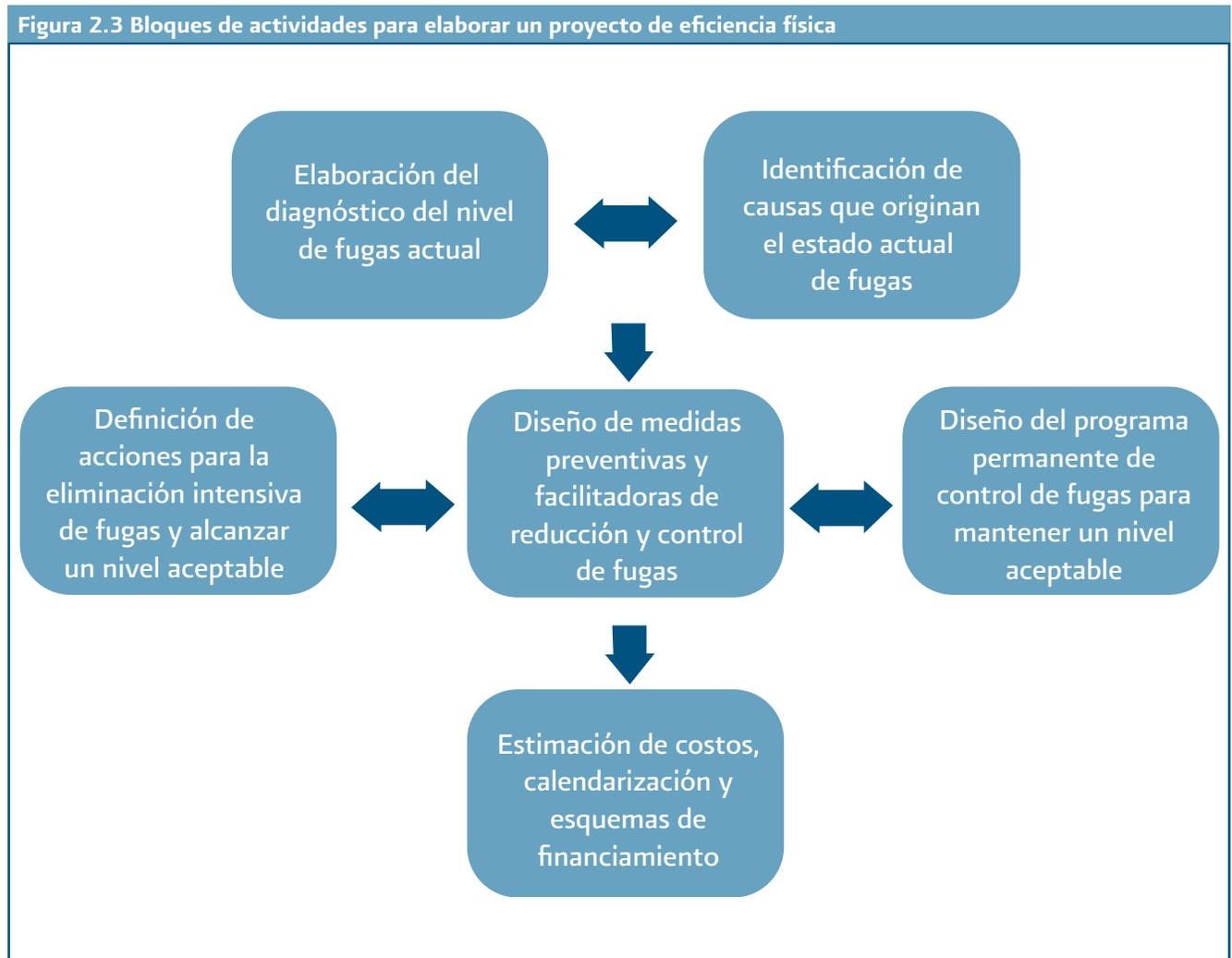
Los elementos de eliminación de fugas son de tipo estructural si se refieren a trabajos de reparación, sustitución y rehabilitación de tuberías y de accesorios.

Los elementos de control son del tipo no-estructural ya que consideran prácticas encaminadas a disminuir el

tiempo desde que aparece una fuga hasta que es eliminada. Dentro de estos trabajos de control de fugas se encuentran el manejo de presiones en la red, la sectorización hidráulica de la distribución del agua, la implementación de sistemas de macro y micromedición, el desarrollo y actualización del catastro de la red, el monitoreo y análisis estadístico de ocurrencia de fugas, la detección sistemática instrumentada y la capacitación y entrenamiento del personal del organismo operador.

En el proyecto de eficiencia física se definen acciones, componentes, estrategias y recursos para reducir fugas a un nivel mínimo deseado en un sistema de agua potable y mantenerlo así en el largo plazo, en condiciones de viabilidad técnica, económica, financiera e institucional.

Con esta perspectiva, el proyecto de eficiencia física se compone de seis bloques de actividades, como se muestra en la figura 2.3.



El punto de partida de actuación depende del avance que cada organismo operador haya desarrollado sobre su proyecto de eficiencia física. No obstante, es preferible verificar y poner en práctica los seis bloques para revisar, actualizar y aumentar la efectividad de las nuevas acciones que se proyecten.

La elaboración del proyecto debe acompañarse de una serie de indicadores que permitan evaluar el impacto de todos los trabajos ejecutados en la etapa de su implementación.

La elaboración del proyecto de eficiencia física resulta más acertada en la medida en que se involucra a más áreas del organismo operador en su proceso de desarrollo, debido a que éstas contribuyen a la identificación de causas y aportan soluciones que no necesariamente son de origen técnico. Por ejemplo, el problema de las fugas puede deberse en buena parte a que los materiales adquiridos por el departamento de compras no cumplen con la calidad necesaria; o también porque los usuarios no tienen la suficiente comunicación o cultura para reportar las fugas.

2.2.1 Elaboración de diagnóstico de la situación actual de fugas

El proyecto de eficiencia física se basa en un diagnóstico actualizado de la situación de fugas en el sistema de abastecimiento. Este diagnóstico se realiza de acuerdo con los lineamientos especificados en la sección 2.1 de esta Manual.

2.2.2 Identificación de causas que originan el estado actual de fugas

Con la identificación de las causas que originan el estado actual de fugas se busca evidenciar las carencias y deficiencias de un sistema de agua potable y de su organismo operador, comparando los resultados de la ocurrencia de fugas y los procedimientos que utiliza la institución en su control, contra un marco de referencia definido como el estado óptimo y eficiente.

Esta actividad se realiza en tres partes:

- a) Obtención del nivel actual de fugas y causas físicas.
- b) Evaluación del estado actual de los subproyectos asociados al control de fugas.
- c) Formulación de árboles de problemas de fugas.

2.2.2.1 Obtención del nivel actual de fugas y causas físicas

El cálculo del nivel actual de fugas y las causas físicas de su ocurrencia se basa en el balance de agua, ejecutado según el procedimiento especificado en la sección 2.1 de este Manual, los muestreos de campo de la sección 1.2.7 y las estadísticas históricas con las que cuenta el organismo operador.

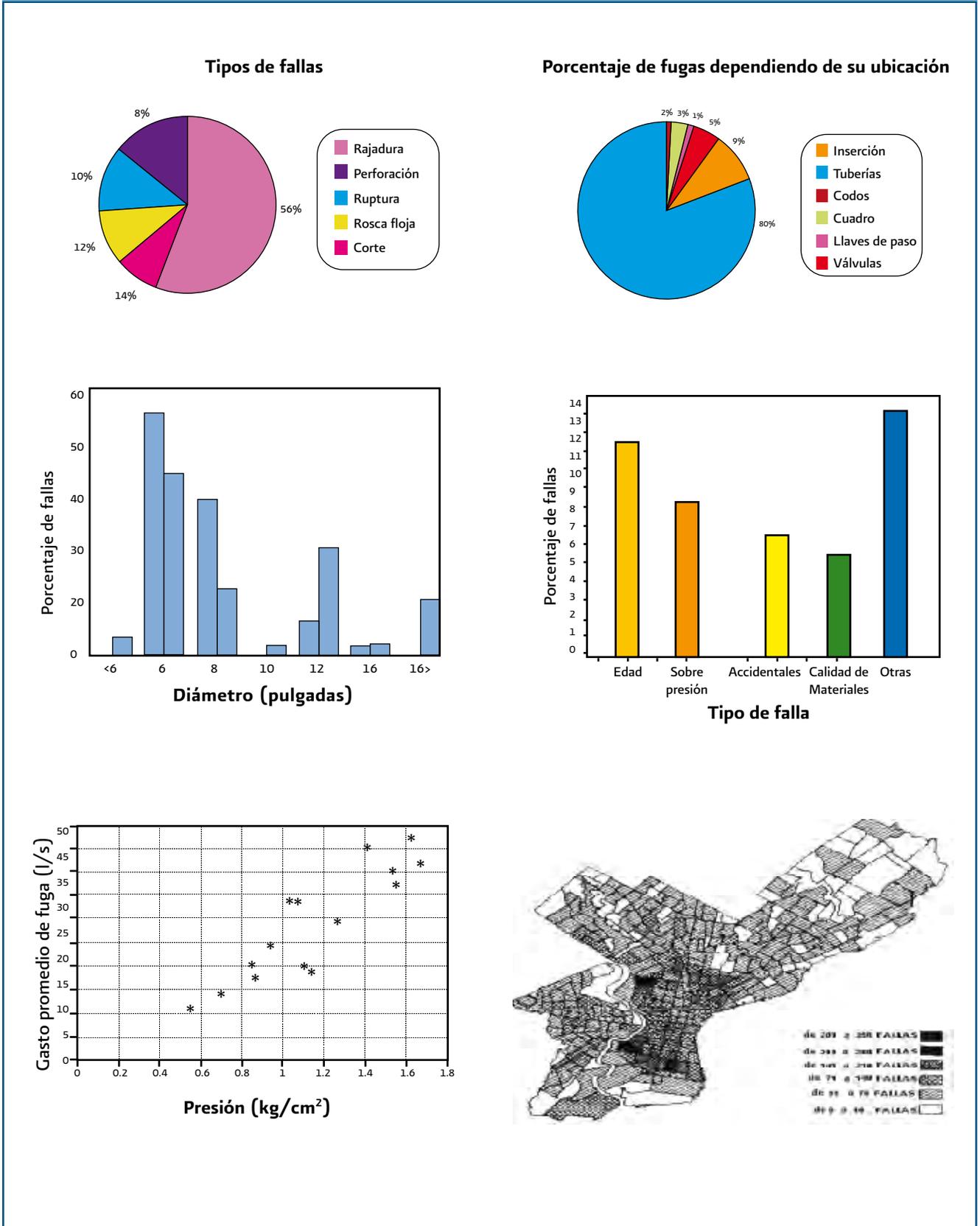
El nivel de fugas actual debe ser expresado en porcentaje del volumen suministrado anualmente al sistema de agua potable. Se recomienda clasificarlo en fugas en tomas domiciliarias, fugas en cajas de válvulas y fugas en tuberías principales y secundarias.

Adicionalmente, con los resultados del levantamiento estadístico de causas de fugas, se establece el origen físico de la ocurrencia de las fugas; es decir, se determinan los porcentajes de fugas según:

- a) el lugar del elemento dónde ocurrieron (inserciones, cuadros, tuberías, estoperos, uniones, coples).
- b) el tipo de fuga (corte, perforación, rajadura, piezas sueltas).
- c) el material de la tubería (cobre, PVC, asbesto-cemento, fierro fundido).
- d) su variación con la presión.
- e) el diámetro de los tubos y zonas de la red.

Algunos ejemplos de cómo presentar este análisis se muestran en las figura 2.4.

Figura 2.4 Ejemplos de presentación de estadísticas de fugas para identificar causas físicas de su ocurrencia



2.2.2.2 Evaluación del estado actual de los subproyectos asociados al control de fugas

Dentro de la estructura operativa y organizacional de un sistema de agua potable existe un conjunto de subproyectos básicos que influyen en el proceso del control de fugas. Los subproyectos básicos que se relacionan con el control de fugas son:

- 1) Sistema de macromedición.- Su desarrollo ayuda a precisar los volúmenes suministrados a la red en los balances de agua y en las pruebas de distritos hidrométricos para la detección de fugas.
- 2) Catastro de infraestructura hidráulica y de red.- Con su implementación se facilita la localización de tramos y elementos de la red, reduciéndose así los tiempos de búsqueda en la reparación de fugas, pruebas de aislamiento de distritos hidrométricos y estrategias de rehabilitación de tuberías.
- 3) Control operacional.- Su impulso permite la valoración de parámetros hidráulicos en la red, establecer controles automáticos de presión y caudal para disminuir el volumen de fugas, y simular con modelos hidráulicos situaciones de reparación de fugas para la toma de decisiones oportuna y confiable.
- 4) Sistema de micromedición.- Su promoción mejora notablemente la evaluación de volúmenes de consumo por los usuarios para la elaboración del balance de agua; también, facilita la detección de fugas intradomiciliarias y la evaluación de sectores y distritos hidrométricos.
- 5) Sectorización de la red.- Su ejecución trae consigo una redistribución de caudales y presiones en la red y se logra la recuperación de caudales de fuga en forma rentable, rápida y efectiva; además se facilita el monitoreo y control de fugas al realizarlo por zonas aisladas.
- 6) Formación de recursos humanos.- Es fundamental la capacitación y entrenamiento del personal involucrado en las labores de diagnóstico, detección, reparación y control de fugas para impactar en la efectividad y sustentabilidad de las acciones respectivas.
- 7) Comunicación y participación social.- Su desarrollo motiva a los usuarios a tomar conciencia sobre el cuidado del agua y la denuncia de ocurrencia de fugas en el sistema de abastecimiento.
- 8) Control de suministros y mantenimiento.- El control

de calidad de los materiales utilizados en la reparación de fugas y los procedimientos constructivos y de mano de obra son determinantes en la recurrencia o no de fugas dentro de la red de distribución. Asimismo, el manejo de estadísticas de fugas permite establecer mejores estrategias en las acciones subsecuentes de reparación y control.

Para evaluar la situación de cada uno de estos subproyectos básicos, se comienza por elaborar una serie de encuestas a los encargados de los departamentos del organismo operador relacionados con el control de fugas. No hay un método específico para proceder; sin embargo, se recomienda elaborar una ficha técnica que describa de manera concreta las actividades que desarrolla el área, los recursos y equipos con los que cuenta, etc. En la tabla 2.8 se muestra un ejemplo del contenido de estas fichas.

Tabla 2.8 Ficha de mantenimiento de la red de distribución (localización, reparación y estadísticas de fugas)

Departamento responsable: Coordinación de Agua Potable

Objetivo: Mantener el mayor tiempo posible un servicio de calidad al usuario, reduciendo al mínimo el tiempo que transcurre entre el surgimiento de una fuga y su rehabilitación, a través de la revisión y ajuste de procedimientos, de la detección y localización de fugas programada por el organismo operador, y de la buena atención y comunicación con los usuarios; además se busca aumentar la eficiencia y eficacia en la conservación y mantenimiento de redes de distribución y tomas domiciliarias.

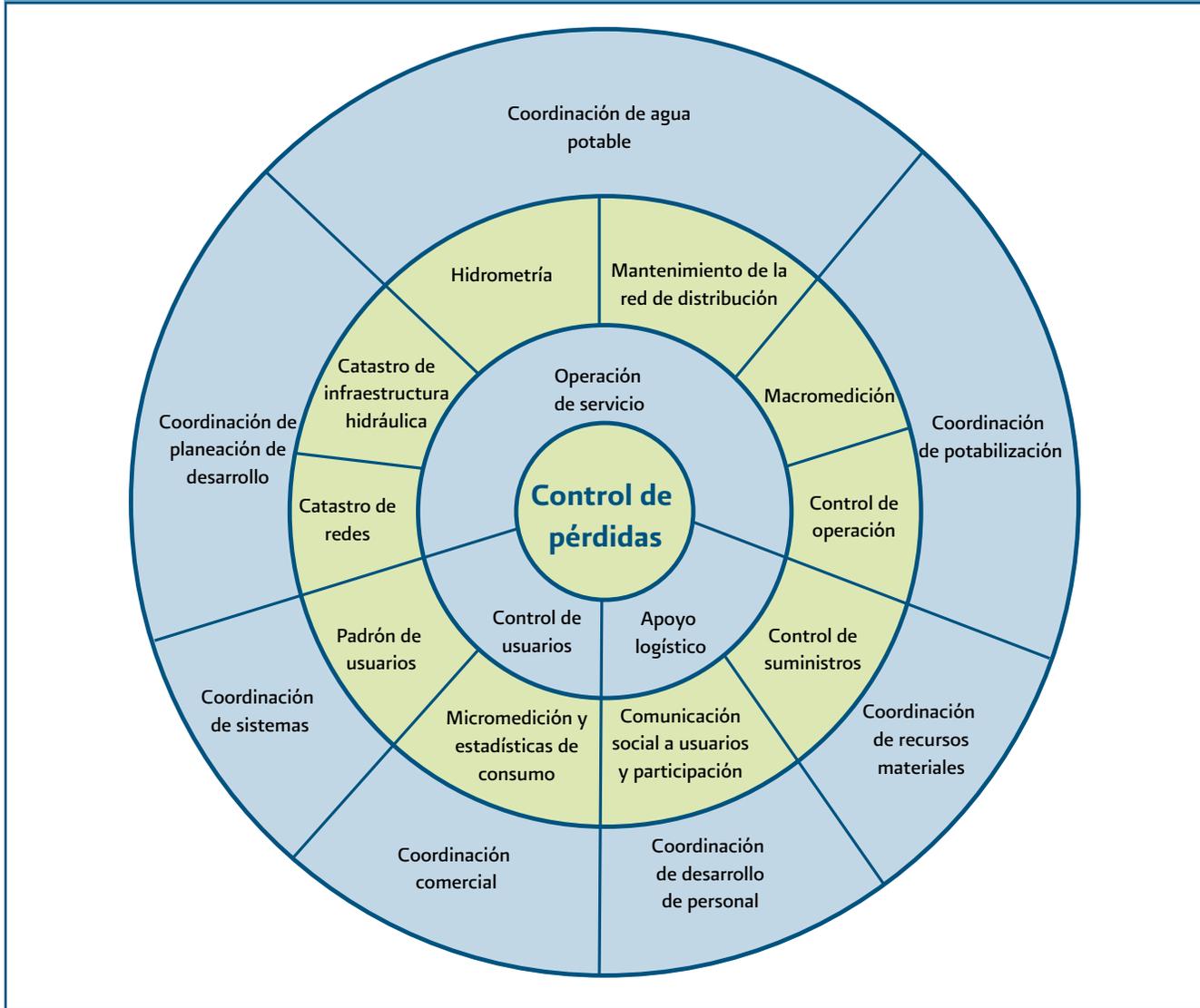
Situación actual: Existe un área exclusiva para la atención de reportes de usuarios sobre fallas en el sistema, principalmente de fugas. Esta área opera de la manera siguiente: a) Se recibe el reporte del problema por parte de usuarios en el centro de diálogo, b) El reporte de usuario es enviado del centro de diálogo al área de mantenimiento y operación de la Coordinación de Agua Potable, c) El encargado del área realiza una evaluación de las acciones a tomar y elabora la orden correspondiente con un folio de identificación, d) Se asigna el trabajo a una cuadrilla para su reparación, e) Una vez que se repara la fuga la cuadrilla, al terminar su turno, entrega la orden de trabajo ejecutada al área técnica de la coordinación, para su evaluación, archivo, y generación de estadísticas, y f) El personal del área realiza una evaluación estadística mensual de los trabajos de reparación de fugas efectuadas en el período, en un sistema de cómputo, mediante el cual se pueden realizar consultas por tipo de falla, tipo de tubería, diámetro, etc.; adicionalmente se elaboran gráficas de tendencia.

Recursos humanos y materiales: Para ejecutar estos trabajos, el departamento de mantenimiento y operación cuenta con un ingeniero civil encargado del área, un auxiliar (sobrestante), y 12 cuadrillas (de las 16 existentes en el área). Se cuenta con equipo de radiocomunicación móvil en vehículos y manuales y uno fijo en la oficina central. Se dispone de 14 vehículos (de los cuales 2 son para los encargados y 12 para las brigadas). También se cuenta con herramienta, equipo y material para la reparación.

Comentarios: El organismo sí tiene un programa intensivo de atención al público sobre fallas en el sistema; sin embargo, el área no cuenta con ningún programa de detección de fugas continuo, no cuenta con personal capacitado en esta actividad y no se dispone de equipos localizadores para llevar a cabo la búsqueda de fugas ocultas. Asimismo, no obstante que se tiene un control estadístico de fugas por computadora, el sistema no cuenta con una base de datos gráfica tipo SIG, por lo que la toma de decisiones en cuanto al mantenimiento preventivo y la rehabilitación difícilmente se logra con la información obtenida en ellas.

Con toda la información recabada en los departamentos del organismo operador, se construye un esquema que describa gráficamente la interrelación de estos departamentos con el programa de control de fugas, colocándolo como eje central de todo el proceso. Un ejemplo de este esquema se muestra en la figura 2.5.

Figura 2.5 Ejemplo de un esquema gráfico de interrelación de los departamentos de un organismo operador con el proceso de control de fugas



2.2.2.3 Formulación de árboles de problemas de fugas

Después de haber elaborado las fichas técnicas y haber establecido las causas físicas del nivel de fugas actual, se realizan reuniones interdisciplinarias con los encargados de los departamentos del organismo operador y el personal que está involucrado con el proceso de control de fugas. El objetivo de dichas reuniones es analizar los problemas que causan las fugas, según el punto de vista y experiencia de cada uno dentro del proceso de administración y operación del sistema de agua potable. Con base en las discusiones de esas reuniones, se construye un árbol de problemas para englobar las causas que están originan-

do el nivel de fugas de agua existentes en el sistema de distribución.

Para elaborar el árbol de problemas se aplica el siguiente procedimiento:

- 1) Listar los problemas principales del estado de fugas.
- 2) Formular el problema central.
- 3) Anotar las causas del problema central.
- 4) Anotar los efectos del problema central.
- 5) Elaborar un esquema que muestre las relaciones de causa-efecto en forma de árbol sinóptico.
- 6) Revisar el esquema completo y verificar su validez.

En la figura 2.6, se muestran algunos componentes de un árbol de problemas típico.

Figura 2.6.A Ejemplo típico de un árbol de problemas de fugas

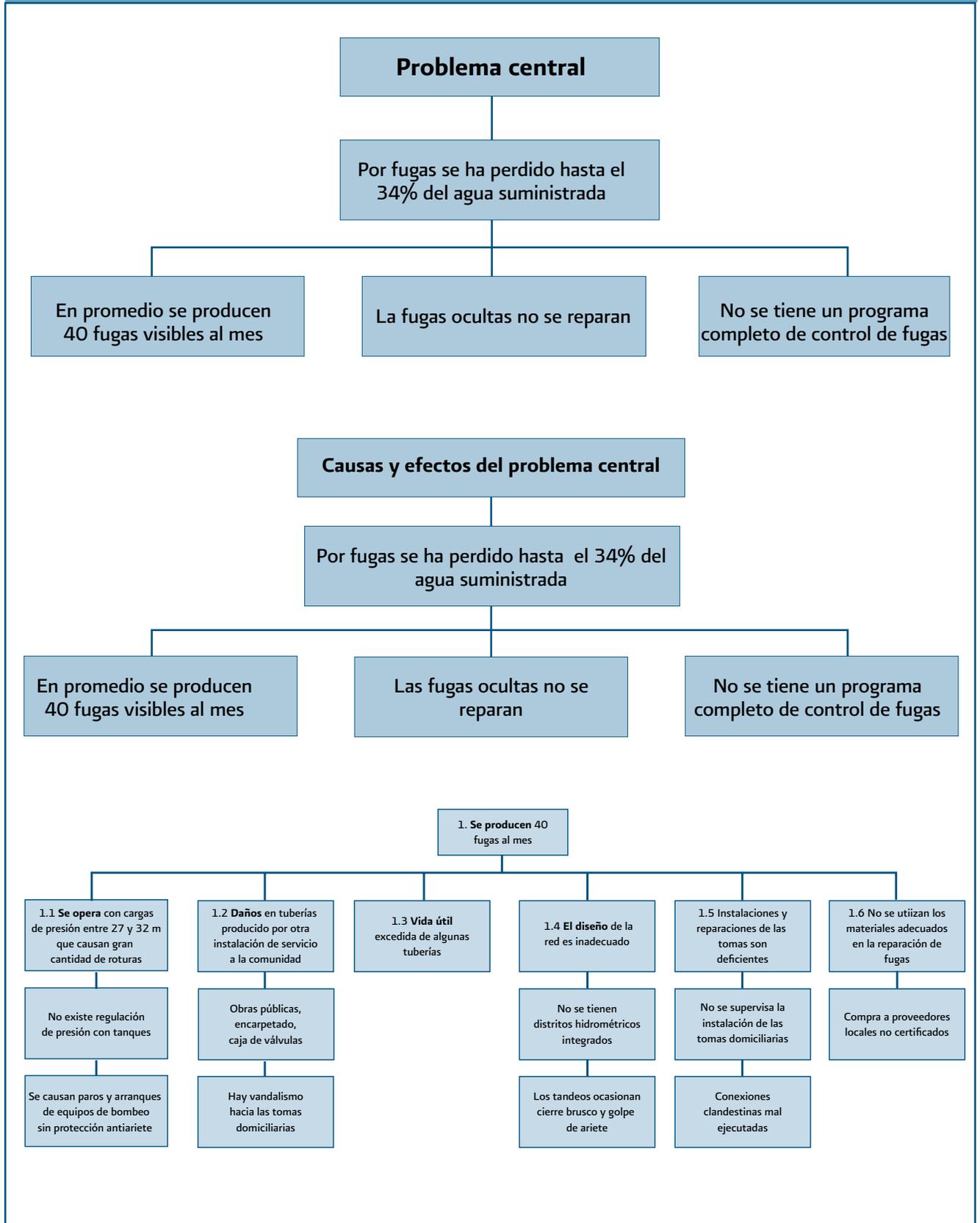
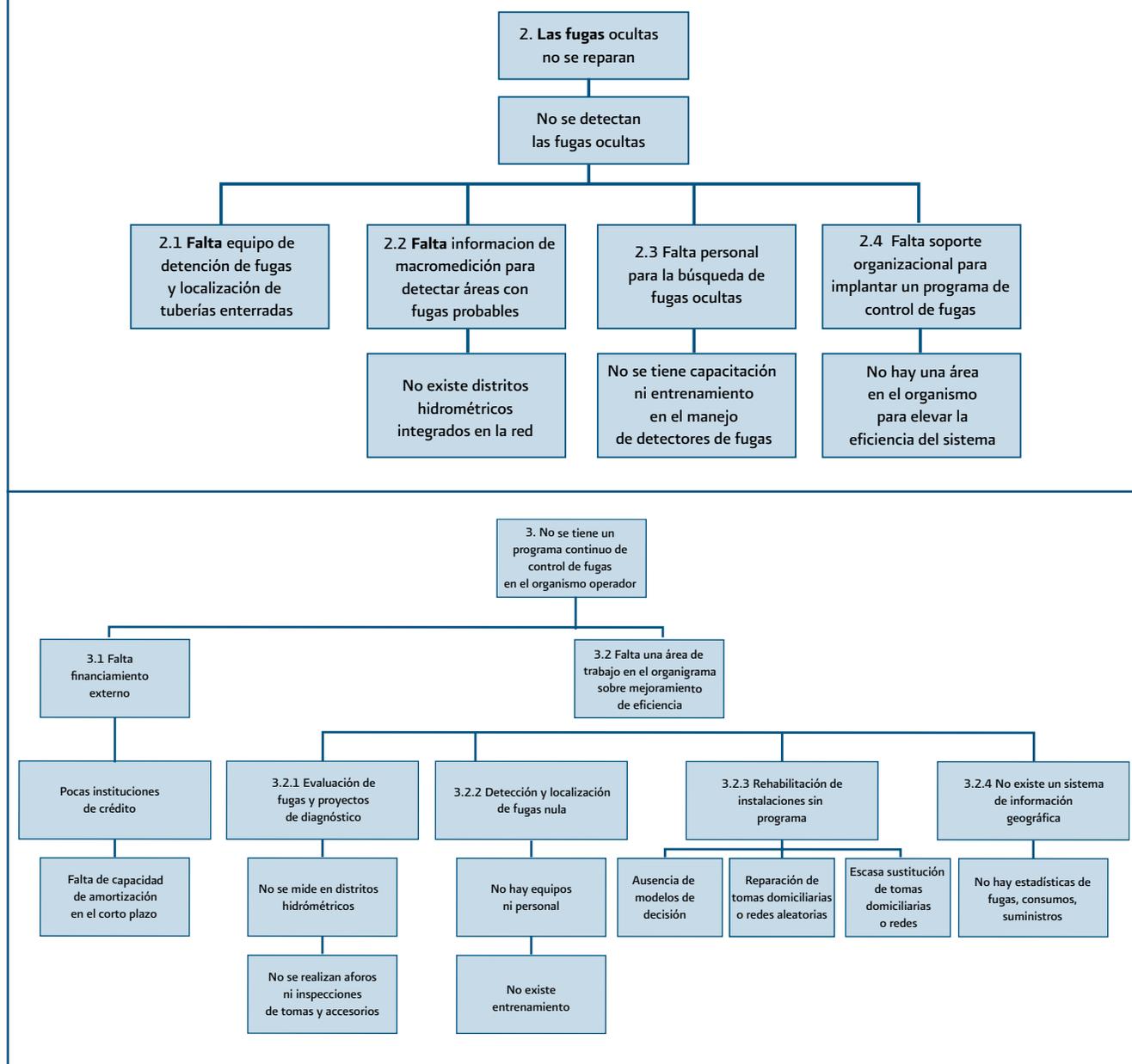


Figura 2.6.B Ejemplo típico de un árbol de problemas de fugas (continuación)



Al elaborar el árbol de problemas, es importante considerar lo siguiente:

- Un problema no es la ausencia de una solución.
- Formular el problema como un estado negativo.
- Escribir cada problema en una tarjeta.
- Identificar problemas existentes (no los posibles, ficticios o futuros).
- La importancia del problema no está determinada por su ubicación en el árbol de problemas.

2.2.3 Diseño de medidas preventivas y facilitadoras de la reducción y control de fugas

La primera acción que se debe ejecutar para llevar a cabo el control de fugas en un sistema de agua potable es conformar un grupo de personas dentro del organismo operador designado exclusivamente a esta actividad. Este grupo tendrá una organización técnica que le permita atender la reparación oportuna de cualquier fuga que se produzca en las instalaciones del sistema de abastecimiento.

Las principales funciones técnicas de este grupo de control de fugas son:

- a) Establecer normas y procedimientos del sistema de mantenimiento de redes.
- b) Definir, analizar y consolidar el sistema de información y estadísticas.
- c) Conducir la adquisición de nuevas tecnologías para la localización y reparación de fugas.
- d) Coordinar la elaboración de manuales de procedimientos para el control de fugas.
- e) Adecuar el área de mantenimiento de redes a los nuevos procedimientos descritos en el presente Manual.
- f) Establecer los programas de capacitación del personal.
- g) Elaborar informes de avance, estadísticas y monitoreo de indicadores del programa de control de fugas.
- h) Establecer medidas correctivas y preventivas de rehabilitación de tuberías y reparación de fugas.
- i) Actualizar periódicamente el diagnóstico de fugas y su esquema de control.

En la tabla 2.9 se muestra un ejemplo de la estructura de un grupo de trabajo de nueva creación para el control de fugas.

Tabla 2.9 Ejemplo de la estructura de un área de nueva creación para el control de fugas

Nombre: Se propone denominar a la nueva área con alguno de los nombres siguientes: “Eficiencia de operación” o “Uso eficiente del agua” o “Eficiencia del servicio”, entre otros.

Misión: Crear y adaptar técnicas para mantener niveles de fugas aceptables y rentables en el sistema de agua potable

Estructura y funciones: Consiste en tres departamentos:

- a) Sistema de información.- Encargado de mantener el SIG (Sistema de Información Geográfica), establecer estadísticas y generar modelos de decisión.
- b) Detección y localización de fugas.- Desarrollar balances físicos y económicos, localizar fugas ocultas y visibles, implantar mecanismos, tecnologías para la localización de fugas.
- c) Reparación de fugas.- Eliminar y aforar fugas, evaluar causas de fallas, costos y estrategias para mejorar la recurrencia de fugas y establecer la comunicación con los usuarios.

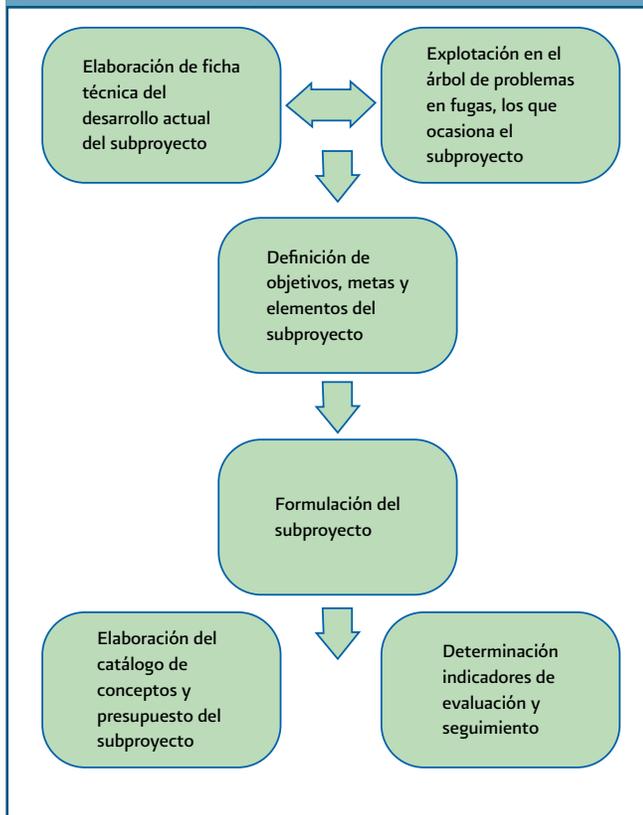
Recursos humanos y materiales: Se contempla la existencia de un jefe por cada departamento, dos técnicos auxiliares, dos brigadas de detección de fugas ocultas, una brigada de hidrometría y una brigada de macromedición; asimismo, se debe tener dos detectores de fugas del tipo electroacústico indirecto, un equipo ultrasónico portátil de medición de caudal, herramientas menores para aforo de fugas, dos equipos de sustitución de tomas domiciliarias, libros y manuales, dos vehículos de transporte ligero (camionetas o trimotos), un espacio con muebles y equipo de oficina, tres equipos de cómputo, software SIG y AutoCad, materiales audiovisuales y sobre todo disponer de un presupuesto fijo anual para efectuar sus programas de trabajo.

Presupuesto anual: Se calcula una inversión inicial de 1 550 000 pesos y para sueldos, materiales e insumos un monto de 665 000 pesos por año.

Una vez diseñada la estructura del grupo de trabajo, se determinarán las medidas preventivas y facilitadores de la reducción y control de fugas, que estarán integradas por los subproyectos básicos mencionados en la sección 2.2.2.2 del Manual. En esta etapa de la elaboración del proyecto de eficiencia física se diseñan todos los elementos que solventarán las deficiencias actuales de dichos subproyectos básicos.

Cada subproyecto básico será diseñado individualmente, pero con una visión integral del organismo operador. Su diseño debe entonces formar parte de un programa de control de fugas completo y la implementación de cada subproyecto básico conducirá a estabilizar un nivel de fugas óptimo y encontrar la autosuficiencia administrativa y financiera correspondiente.

Figura 2.7 Diagrama de diseño de subproyectos básicos para el control de fugas



En la figura 2.7 se muestra un diagrama que indica el procedimiento que se sigue para diseñar un subproyecto básico. En el manual de “Planeación de acciones de incremento y control de la eficiencia física en sistemas de agua

potable” publicado por la CONAGUA¹⁰, se encuentra un catálogo detallado de los subproyectos que pueden ser útiles para orientar su diseño.

2.2.4 Definición de acciones para la eliminación intensiva de fugas para alcanzar un nivel aceptable

Las acciones para eliminar en forma intensiva las fugas se aplican cuando el nivel rebasa el 20% del volumen suministrado al sistema. Este valor se obtiene del balance de fugas descrito en la sección 2.1 de este Manual.

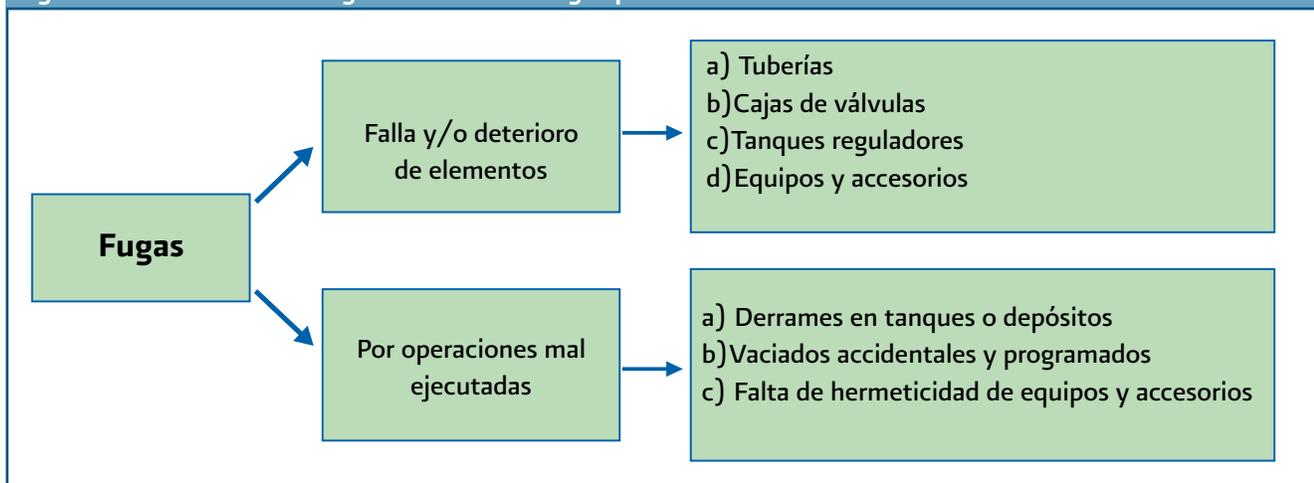
La actividad de eliminación intensiva de fugas consiste en localizar las fugas y repararlas a través de la implementación de medidas urgentes y de corto plazo. Por lo tanto, resulta importante en esta sección del Manual, analizar el origen de las fugas y las técnicas de localización y reparación existentes.

2.2.4.1 Origen de las fugas y técnicas de localización y reparación

Una fuga es agua que se escapa del sistema de abastecimiento de manera descontrolada por causa de roturas, uniones abiertas, fisuras y malas reparaciones en tuberías y tanques. Los derrames en los depósitos, los vaciados de tuberías, los desfuegos, el purgado de máquinas, etc.; en fin, toda el agua que se escapa y que nadie utiliza es considerada una fuga.

Las causas de fugas se aprecian en la figura 2.8.

Figura 2.8 Clasificación de fugas en sistemas de agua potable

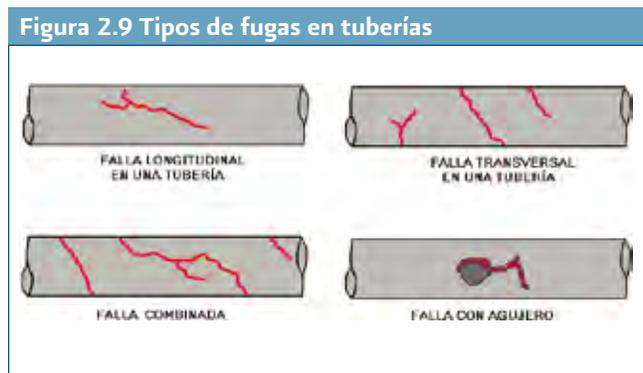


¹⁰ “Planeación de acciones de incremento y control de la eficiencia en sistemas de agua potable”, 2005, Subdirección General de Infraestructura Hidráulica, Urbana e Industrial. CONAGUA, México.

Las fugas pueden ser visibles u ocultas. Las visibles brotan a la superficie y humedecen el terreno. La mayoría de estas fugas las reportan los usuarios, fontaneros o personal del organismo operador y normalmente duran poco tiempo (de dos horas a siete días), dependiendo de la capacidad del organismo operador para realizar la reparación.

Las fugas ocultas se filtran en el suelo y no se sabe dónde están. A veces estas fugas entran a los drenajes, cajas de válvulas y son difíciles de encontrar. Muchas fugas ocultas son pequeñas cuando ocurren, pero crecen con el tiempo. Así, el promedio de vida de este tipo de fugas puede ser de varias semanas, meses y hasta años. En general, es correcto suponer que este tipo de fugas tienen periodos de existencia iguales a un año en zonas de la ciudad relativamente nuevas, de dos a cinco en áreas seminuevas y de diez años o más en zonas muy antiguas.

Las fugas se presentan en distintas formas. Algunas de ellas ocurren en los accesorios de las tuberías y en el cuerpo de la tubería, pudiendo ser éstas rajaduras y agujeros. Las rajaduras se dividen en longitudinales y transversales, dependiendo de la causa de la falla, como se observa en la figura 2.9.



Las fugas más comunes en tomas domiciliarias ocurren por fallas en la inserción con la tubería de distribución, en sus codos y uniones, y en el mismo cuerpo de la tubería cuando el material es de muy baja calidad.

En las cajas de válvulas la falla más común se encuentra en la base de su volante (*estopero*) y en las juntas.

Particularmente, en los tanques elevados las fugas ocurren debido al agrietamiento de las estructuras o al rebose de las mismas. Generalmente, son de gran magnitud, pero muy esporádicas, por lo que merece especial atención la inspección y el mantenimiento de las válvu-

las de control del nivel en el tanque.

Dentro de los domicilios, las fugas se presentan principalmente en los herrajes de los inodoros.

Las fugas se pueden presentar cuando ocurren los siguientes fenómenos:

- Presión alta del agua dentro de la tubería.
- Corrosión externa en tubos metálicos debido al contacto con el suelo.
- Corrosión interna por la mala calidad del agua que transporta el tubo.
- Paso de vehículos pesados sobre tubos a poca profundidad.
- Mala calidad de los materiales y accesorios de los tubos.
- Mala calidad de mano de obra con que se instalan o reparan los tubos.
- Tuberías con muchos años de antigüedad.
- Movimientos del suelo (sismos).

En la actualidad, la localización de fugas ocultas se basa principalmente en la detección del sonido que producen. Al escapar el agua a presión, genera vibraciones en el punto de escape y produce sonidos en un rango de frecuencia de entre 350 y 2000 Hz (ciclos por segundo). Los sonidos ambientales se encuentran en el intervalo de hasta 350 Hz.

En tuberías metálicas el sonido se transmite mejor que en las no metálicas. Las presiones altas facilitan la localización, puesto que al salir el agua con mayor velocidad, se produce un sonido que se propaga con mayor intensidad. Una fuga pequeña (orificio o grieta) tiene un sonido agudo de alta frecuencia y una fuga grande (tubería rota o junta defectuosa), un sonido grave de poca intensidad y baja frecuencia. En suelos porosos se disipa más fácilmente el sonido de la fuga, que en suelos compactos.

Para amplificar el sonido de las fugas se fabrican instrumentos electrónicos con una gran diversidad de diseños y características. Los equipos detectores de fugas se pueden agrupar de la siguiente manera:

1) Equipos de detección directa.- Son aquéllos que requieren de un punto de contacto con las tuberías, tomas domiciliarias o válvulas de la red. Comúnmente detectan el sonido de la fuga que viaja a tra-

vés de estos elementos. Dentro de esta clasificación se encuentran los geófonos de punta y correladores. En la figura 2.10 se muestran fotografías de estos detectores de fugas.

Figura 2.10 Correlador localizador de fugas



2) Equipos de detección indirecta.- Estos equipos no necesitan contacto con ningún elemento de la red para funcionar. Normalmente detectan el sonido que viaja por el suelo donde se encuentra enterrada

la tubería. Dentro de esta categoría están los geófonos de piso fundamentalmente. En la figura 2.11 se muestra una fotografía de este tipo de detector de fugas.

Figura 2.11 Geófono localizador de fugas



La detección de fugas debe realizarse preferentemente en la noche debido a que durante el día, principalmente en las áreas urbanas, los ruidos ambientales interfieren y se mezclan con el de las fugas dificultando su localización.

La reparación de fugas puede llevarse a cabo de dos formas: mediante rehabilitación del elemento dañado observando las especificaciones de instalación y materiales,

o mediante la sustitución del tramo dañado. La decisión de reemplazar (rehabilitación), o reparar las tuberías o componentes del sistema, se basa en considerar factores como: presiones en la red, tipo de terreno, vida útil de la tubería, tipo y calidad del material, diseño inadecuado, el factor de rugosidad de la tubería, operación de la red y los programas de mantenimiento. Los registros históricos de fugas también se emplean en esta decisión.

Un reemplazo es justificado cuando se tienen niveles elevados de:

- a) Frecuencia de daños.
- b) Corrosión externa en las tuberías, tomas y piezas especiales.
- c) Costos elevados de reparación de los daños.
- d) Daños severos en la red principal.

Una reparación es justificada cuando existe:

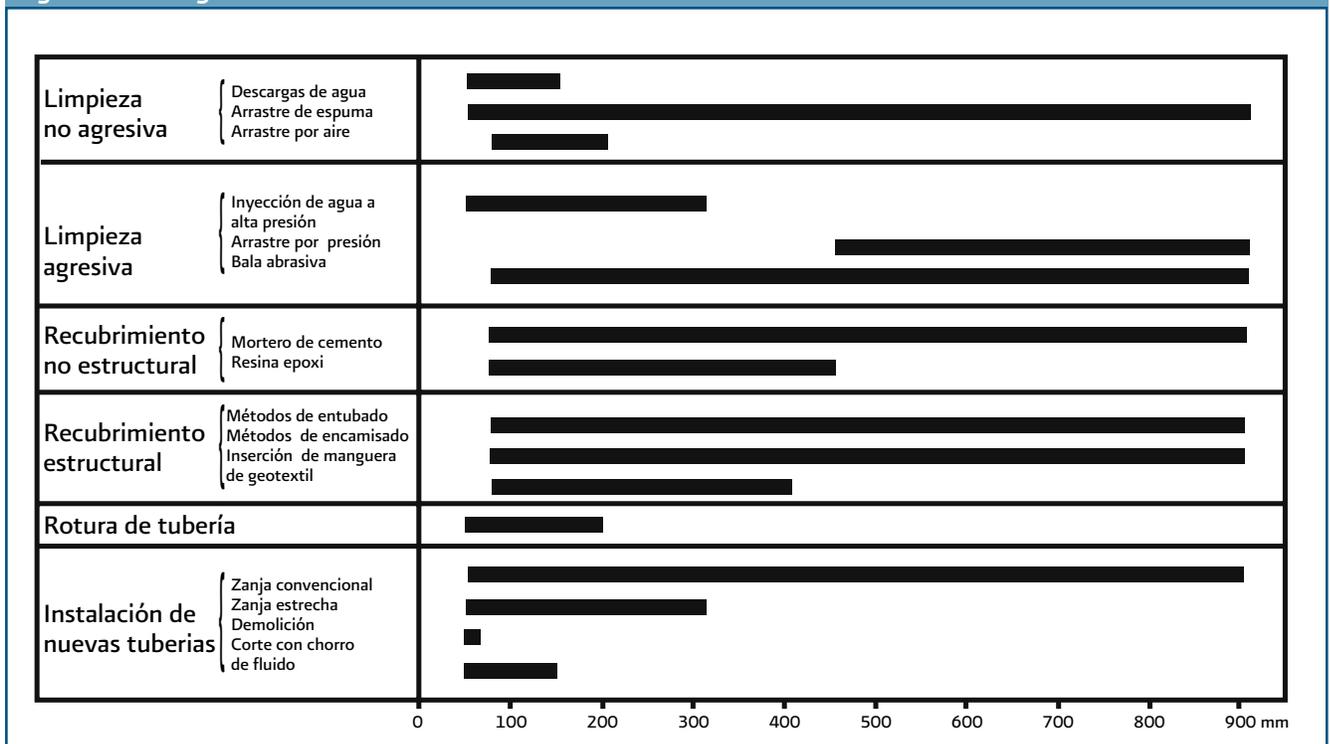
- a) Baja de presión no significativa en la línea.
- b) Daños locales pequeños en la red principal y en tomas domiciliarias.
- c) Baja frecuencia de daños.

Existen varios métodos y tecnologías comerciales para rehabilitar y renovar tuberías¹¹, entre los cuales se encuentran los siguientes:

- a) Limpieza no agresiva.- Descargas de agua, arrastre con espuma y aire.
- b) Limpieza agresiva.- Corros de agua a altas presiones, rascado a presión, bala abrasiva.
- c) Revestimiento no estructural.- Revestimiento de mortero de cemento y resina epoxi.
- d) Revestimiento estructural.- Entubado, encamisado y manguera de geotextil.
- e) Restitución de tubería.- Empuje de tubería vieja por tubería nueva con rotura.
- f) Instalación de tuberías nuevas.- Restitución de tubería vieja por zanjeado.

En la figura 2.12 se presenta un resumen de los rangos de diámetros en donde los métodos son más efectivos.

Figura 2.12 Rango de diámetros de tubería donde los métodos de rehabilitación son efectivos



¹¹ Cabrera R. E. y Cabrera M. E., 2004, "Técnicas modernas de rehabilitación y renovación de tuberías, Evaluación y control de pérdidas en redes urbanas", Instituto Tecnológico del Agua, UPV, España.

2.2.4.2 Procedimiento para localización y reparación de fugas en tomas domiciliarias

La detección y localización de fugas en tomas domiciliarias se hace con base en la evaluación de fugas por muestreo estratificado, jerarquizando las zonas con mayor incidencia de fugas. Si se trata de fugas visibles, la localización se lleva a cabo con un programa de inspección en ruta; en cambio, si son fugas ocultas será necesario aplicar técnicas de caída de presión y localización con equipos electroacústicos de contacto e indirectos. La reparación se puede realizar excavando y sustituyendo el tramo dañado, mientras que para la sustitución de tomas se recomienda mejor el empleo de equipos de tensión o topes, sin excavar. También, se deben elaborar las estadísticas respectivas y hacer reportes para la toma de decisiones.

Se elabora un plan de inspección, jerarquizando las colonias o zonas, primero en aquellas donde existan más fugas visibles y después en donde haya más fugas ocultas, contemplando también como prioritarias las zonas donde exista mayor presión de agua en la red. Se organizan los recorridos en función de los horarios de suministro, los problemas de tráfico y ruido, la sincronización con las cuadrillas de reparación, etc., y se elaboran los formatos de campo y captura de información.

Se adquieren localizadores de fugas del tipo electroacústico indirecto y de contacto y se elaboran los formatos de levantamiento de datos y aviso a usuarios. Después se ejecuta el programa de detección y localización de fugas, utilizando los equipos localizadores de fugas y los manómetros para registro de presión; se dejan marcados los lugares con posibles fugas y se entregan los reportes a las cuadrillas de reparación.

Es necesario elaborar estadísticas de fallas y aforar las fugas. Se calculan los indicadores siguientes y se evalúan periódicamente:

- 1) Porcentaje de tomas inspeccionadas = $\frac{\text{número de tomas inspeccionadas}}{\text{número de tomas por inspeccionar}}$
- 2) Porcentaje de ocurrencia de fugas en tomas = $\frac{\text{número de tomas con fuga encontradas}}{\text{número de tomas inspeccionadas}}$
- 3) Porcentaje de ocurrencia de fugas por tipo de material, lugar de la fuga, tipo de falla
- 4) Gasto unitario de fuga en toma domiciliaria

2.2.4.3 Localización y reparación de fugas en cajas de válvulas

La detección y localización de fugas en cajas de válvulas se hace con base en una inspección visual de todas las cajas de válvulas de la red de distribución. La reparación se realiza sustituyendo la válvula dañada, o bien cambiando algunas piezas o empaques de la misma. Se deben elaborar las estadísticas respectivas y hacer reportes para la toma de decisiones. Se debe estar preparado para localizar cajas de válvulas cubiertas con pavimento.

La localización y reparación de fugas en caja de válvulas comienza consultando los resultados estadísticos de ocurrencia de fugas con el fin de estimar los posibles porcentajes de fugas por reducir. Se recopilan planos de la red de distribución ubicando las cajas de válvulas. Se elabora un plan de inspección, jerarquizando las cajas de válvulas, primero las más antiguas, después las de mayor diámetro y posteriormente en las que se tenga mayor presión de agua en la red.

Se organizan los recorridos en función de los horarios de suministro, los problemas de tráfico y ruido, la sincronización con las cuadrillas de reparación, etc., y se elaboran los formatos de campo y captura de información. Se adquieren herramientas para destapar cajas, localizadores de objetos metálicos enterrados y se elaboran formatos de levantamiento de datos.

Se detectan y localizan las fugas utilizando los equipos localizadores de objetos metálicos para encontrar las cajas de válvulas enterradas; se dejan marcadas las cajas con fugas y se entregan los reportes a las cuadrillas de reparación.

Es necesario elaborar estadísticas de fallas y aforar las fugas. Se calculan los indicadores siguientes y se evalúan periódicamente:

- 1) Porcentaje de cajas inspeccionadas = $\frac{\text{número de cajas inspeccionadas}}{\text{número de cajas por inspeccionar}}$
- 2) Porcentaje de ocurrencia de fugas en cajas de válvulas = $\frac{\text{número de cajas con fuga}}{\text{número de cajas inspeccionadas}}$
- 3) Porcentaje de ocurrencia de fugas por tipo de válvula, lugar de la fuga, tipo de falla
- 4) Gasto unitario de fuga en caja de válvula

2.2.4.4 Localización y reparación de fugas en tuberías principales y secundarias, y en tanques

La detección y localización de fugas en tuberías principales y secundarias se hace jerarquizando las zonas con mayor incidencia de fugas. Si se trata de fugas visibles, la localización se lleva a cabo mediante un programa de inspección visual; en cambio, si son fugas ocultas será necesario aplicar técnicas de caída de presión, localización con equipos electroacústicos de contacto e indirectos y en ocasiones, con correlacionador electrónico. La reparación se realiza colocando abrazaderas metálicas en el tramo dañado. También, se deben elaborar las estadísticas respectivas.

La localización y reparación de fugas en tuberías principales y secundarias se realiza de acuerdo con los siguientes puntos:

- 1) Se consultan las estadísticas de ocurrencia de fugas con el fin de estimar los posibles porcentajes de pérdidas de agua por reducir.
- 2) Se analizan los resultados estadísticos de la ocurrencia de fugas por zona de la ciudad.
- 3) Se elabora un plan de inspección, jerarquizando las colonias o zonas. Se priorizan aquellas donde existan más fugas visibles y después en donde existan más fugas ocultas, contemplando también como prioritarias las zonas donde exista mayor presión de agua en la red y donde las tuberías sean más antiguas.
- 4) Se organizan los recorridos en función de los horarios de suministro, los problemas de tráfico y ruido, la sincronización con las cuadrillas de reparación, etc., y se elaboran los formatos de campo y captura de información.
- 5) Después se ejecuta el programa de detección y localización de fugas, se dejan marcados los lugares con posibles fugas y se entregan los reportes a las cuadrillas de reparación. Es necesario elaborar estadísticas de fallas y aforar las fugas con métodos de uso común.

Se calculan los indicadores siguientes y se evalúan periódicamente:

- 1) $\text{Porcentaje de longitud de tubería inspeccionada} = \frac{\text{longitud de tubería inspeccionadas}}{\text{longitud total de tubería por inspeccionar}}$.
- 2) $\text{Porcentaje de ocurrencia de fugas en tuberías} = \frac{\text{número de fugas encontradas}}{\text{número total de fugas en el sistema}}$.

- 3) Porcentaje de ocurrencia de fugas por tipo de material, lugar de la fuga, tipo de falla.
- 4) Gasto unitario de fuga en tubería principal o secundaria.

2.2.5 Diseño del programa permanente de control de fugas para mantener un nivel aceptable

El objetivo del control de fugas es reducir al mínimo el tiempo que transcurre entre el surgimiento de una fuga y su eliminación, a través de la revisión y ajuste continuo de procedimientos y acciones, con el fin de aumentar la eficacia de la conservación y mantenimiento de la red de distribución.

El control de fugas de agua es una actividad continua en tiempo y espacio donde se establecen los procesos para coordinar las acciones de localización y eliminación de fugas, apoyándose en un monitoreo continuo de la red, los reportes de fugas detectadas por usuarios, programas de búsqueda sistemática de fugas ocultas, elaboración periódica de balances y muestreos de evaluación, etc.

La formulación del proyecto de control de fugas se realiza de la manera siguiente:

- 1) Con un muestreo de campo y datos estadísticos recientes se elabora una evaluación de pérdidas y un balance del agua con el fin de estimar los porcentajes de agua por reducir en cada rubro.
- 2) Se recopila información y datos para la reducción de fugas, como por ejemplo, personal, presupuesto, procedimientos, equipos, resultados e indicadores.
- 3) Se determinan las causas de la ocurrencia de pérdidas de agua señalando los problemas principales, los equipos y recursos humanos necesarios, las acciones requeridas a corto y mediano plazos.
- 4) Se establece un programa de control de fugas para definir las actividades generales, priorizadas y calendarizadas, con sus costos y beneficios, e indicando sus fuentes de financiamiento.
- 5) Se ejecutan las acciones a corto plazo, como puede ser la implantación de un departamento de control de fugas, módulos de atención al público para reporte de fugas, equipos urgentes, capacitación al personal, etc.
- 6) Después se inicia el proceso de eliminación de pérdidas e implantación del proceso coordinado con las acciones de control.
- 7) Se ejecuta el control de estadísticas y el monitoreo de información.

- 8) Se elabora el balance del agua cada año y se evalúan periódicamente los indicadores siguientes:
- Porcentaje de pérdidas potenciales = volumen de pérdidas / volumen producido.
 - Relación beneficio-costo de la reducción y con-

trol = costo de acciones / costo del agua recuperada.

En la tabla 2.10 se presentan las actividades específicas que se deben desarrollar en un programa de control de fugas de sistemas de agua potable.

Tabla 2.10 Secuencia de actividades para implementar un programa de control de fugas

Prioridad	Acción específica	Costo unitario (\$/toma registrada)
1	Conformación de los grupos de personal técnico, administrativo y de campo que desarrollarán las actividades de mejora de eficiencia física (control de fugas) con equipos de oficina, cómputo, cuadrillas de campo y herramientas.	1.75
2	Implantación de los procedimientos de recepción, análisis, canalización y seguimiento de los reportes de fugas.	1.39
3	Gestión ante la compañía de telefonía para la asignación de números telefónicos fácilmente memorizables para atender reportes del público.	0.19
4	Diseño, elaboración e implantación de formatos de campo y de recepción de reportes.	0.58
5	Promoción de la colaboración del público para el reporte de fugas mediante publicidad, procedimientos y acuerdos de coordinación.	0.68
6	Establecimiento de una reserva mínima de materiales de uso frecuente para reparación.	10.47
7	Mantenimiento y reposición de equipos, herramientas y vehículos.	3.70
8	Programa de pruebas de muestreo en campo para identificar ocurrencia de fugas.	1.96
9	Programa de búsqueda sistemática de fugas visibles en tomas domiciliarias de acuerdo con las estadísticas de fugas.	1.54
10	Programa de evaluación sistemática del estado de válvulas.	1.56
11	Programa de búsqueda sistemática de fugas visibles en tuberías principales y secundarias de acuerdo con las estadísticas de fugas.	1.06
12	Adquisición de equipos detectores de fugas y localización de metales.	5.50
13	Programa de búsqueda sistemática de fugas ocultas en tomas domiciliarias y tuberías principales.	1.59
14	Implantación de un sistema de monitoreo en tiempo real y de información geográfica para búsqueda y detección de fugas ocultas.	2.89

2.2.6 Estimación de costos, calendarización y esquema de financiamiento

El proyecto de eficiencia volumétrica queda terminado con el cálculo de cantidades y costos de las actividades individuales, con su calendarización y su presupuesto. Asimismo, deben recomendarse los posibles esquemas de financiamiento y dejarlos escritos en el informe final del Programa.

Un punto importante es la priorización de las acciones y subproyectos básicos, lo cual puede realizarse de dos maneras: con base en la relación beneficio-costos o atendiendo a su secuencia técnica lógica de ejecución.

La evaluación de la relación beneficio-costos (B/C) tiene el propósito de demostrar el resultado económico financiero de las acciones y subproyectos básicos. Conceptualmente, se pueden distinguir los tres casos siguientes:

$B/C > 1$ Demuestra el incremento del rendimiento promovido por los proyectos y acciones

$B/C = 1$ Muestra que los proyectos no surtirán efecto económico

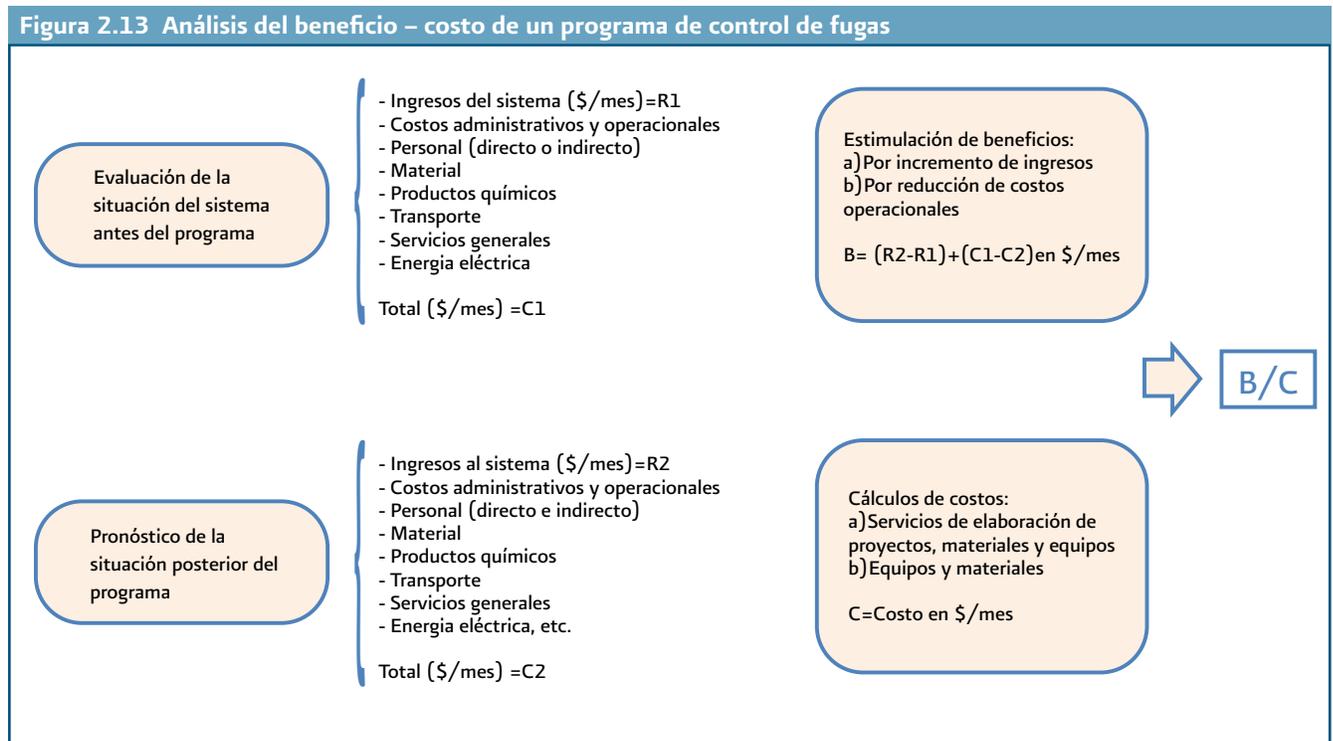
$B/C < 1$ Muestra que los proyectos tendrán efectos negativos en la economía del sistema de agua

La manera de realizar el citado análisis beneficio-costos global se propone en la figura 2.13.

La priorización de las acciones y subproyectos básicos atendiendo a la secuencia lógica de ejecución, se complementa con el análisis de beneficio – costo. Para ello hay que tener en cuenta que las acciones de eliminación de fugas dependen de algunos subproyectos básicos y a su vez, dichos subproyectos dependen de su grado de desarrollo. También es necesario recordar que de igual manera, el control de fugas depende de que se ejecuten acciones de eliminación.

Siempre se buscará que la implementación de un control de fugas, con sus acciones de eliminación intensiva, medidas facilitadoras y subproyectos básicos, sean acciones autofinanciables y promuevan la sustentabilidad del organismo operador. Por lo tanto, se debe efectuar un análisis financiero profundo y buscar de qué forma las inversiones pueden ser amortizadas con los ahorros directos de agua, o los ahorros indirectos por el ahorro de energía eléctrica o procesos de potabilización.

No obstante, en muchas ocasiones el organismo no tiene el capital suficiente para ejecutar inversiones, por lo que puede recurrir a instancias estatales, federales e internacionales para obtener créditos, siempre y cuando demuestre en su análisis financiero la rentabilidad de los proyectos.



Sección 3 Eficiencia hidráulica

3.1 Diagnóstico de eficiencia hidráulica

La eficiencia hidráulica se define como la relación entre la capacidad de captación, conducción y distribución del agua con la que cuenta un sistema hidráulico de abastecimiento urbano, y la capacidad real con la que funciona dicho sistema. No hay un indicador específico para determinar el valor de la eficiencia hidráulica; sin embargo, la manera más práctica de valorarla es a través de algunos parámetros sobre la disponibilidad espacial y temporal del agua a los usuarios. Algunos de estos parámetros son:

- Consumo unitario de los usuarios (l/hab/día)
- Dotación (l/hab/día)
- Continuidad del servicio de agua (horas/día)
- Déficit entre el caudal de agua disponible en la red y el caudal de agua requerido por los usuarios (\pm %)
- Presión media del agua en la red de distribución (kg/cm^2)

A continuación se dan algunas recomendaciones para la estimación de cada uno de estos parámetros.

3.1.1 Consumo unitario de los usuarios

El consumo unitario se clasifica en doméstico y no-doméstico. El consumo unitario doméstico es un parámetro que indica la cantidad de agua que utiliza un habitan-

te común en un día típico promedio en una población. El cálculo se consigue aplicando la ecuación 3.1.

$$Cu_d = \frac{C_d}{n_p} \quad (3.1)$$

Donde:

Cu_d = Consumo unitario doméstico (l/hab/día)

C_d = Consumo total doméstico diario (l/día)

n_p = Número de habitantes servidos de la localidad

La Comisión Nacional del Agua, CONAGUA¹², determinó los consumos unitarios domésticos, clasificados por tipo de usuario (residencial, medio y popular) y en función de la temperatura media anual de la población (clima). Estos valores se reproducen en la tabla 3.1 y pueden ser utilizados para comparar los datos obtenidos en una localidad, o bien para el diseño cuando no se cuenta con estadísticas al respecto.

¹²CONAGUA, 1993, "Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS)", Libro V.1. Datos Básicos, México.

Tabla 3.1.A Consumo unitario doméstico, CONAGUA

Clima	Consumo unitario por clase socioeconómica (l/hab/día)		
	Residencial	Media	Popular
Cálido	400	230	185
Semicálido	300	205	130
Templado	250	195	100

Nota: Para los climas fríos se consideran los mismos valores que para clima templado

Tabla 3.1.B Clasificación de clima de localidades mexicanas, CONAGUA

Temperatura media anual (C°)	Tipo de clima
Mayor que 22	Cálido
De 18 a 22	Semicálido
Menor que 18	Templado o frío

El cálculo del consumo unitario doméstico, según los datos de CONAGUA, se obtiene mediante un promedio ponderado en función de los porcentajes de clases socioeconómicas existentes en la localidad en estudio.

El consumo unitario no-doméstico es la relación de la suma de consumos comerciales, industriales y especiales, en un día típico promedio, dividido entre el número de habitantes de una localidad. La intención del cálculo de este consumo unitario no-doméstico es conocer qué proporción de la cantidad de agua suministrada a los usuarios no-domésticos, le corresponde a cada habitante de la población.

3.1.2 Dotación

La dotación es la cantidad de agua asignada a cada habitante, considerando todos los consumos de los servicios y las pérdidas en la red en un día medio anual; sus unidades están dadas en l/hab/día.

La dotación se obtiene a partir de un estudio de Balance de Agua (Sección 2.1 del Manual), dividiendo la suma del consumo total, que incluye servicio doméstico, comercial, industrial y de servicios públicos, más las pérdidas de agua, entre el número de habitantes de la localidad. También puede calcularse mediante la ecuación 3.2.

$$\text{Dot} = \frac{\text{Vol}_{sc}}{n_p * 365} * 1000$$

(3.2)

Donde:

Vol_{sc} = Volumen suministrado al sistema en un año corregido (m³)

Dot = Dotación (l/hab/día)

n_p = Número de habitantes servidos de la localidad

3.1.3 Continuidad del servicio de agua

El valor representativo de continuidad del servicio de agua en una red de distribución de agua potable se determina mediante un promedio ponderado de las horas que se proporciona en las diversas zonas de servicio de la localidad, mediante la ecuación 3.3.

$$\text{hr}_{servicio} = \frac{\sum_{i=1}^{n_z} \%_{z,i} \text{hr}_{servicio,i}}{24}$$

(3.3)

Donde:

$\text{hr}_{servicio}$ = Horas promedio de continuidad del servicio de agua de un sistema de agua potable

$\%_{z,i}$ = Porcentaje de cobertura de red o tomas domiciliarias de una zona de servicio de la red

$\text{hr}_{servicio,i}$ = Horas de continuidad del servicio de agua potable de una zona de servicio de la red

i = Zona de servicio

n_z = Número total de zonas de servicio de agua potable en una red

3.1.4 Déficit entre el caudal de agua disponible en la red y el caudal de agua requerido por los usuarios

Por diversas razones, tales como la ubicación de las captaciones del sistema de abastecimiento, la capacidad hidráulica de la infraestructura de conducción, distribución y regularización, la topografía de la localidad, el crecimiento de la mancha urbana, etc., la disponibilidad del agua potable ofertada por el sistema hidráulico es dife-

rente al agua requerida por los usuarios. Este problema trae como consecuencia una ineficiencia hidráulica en la distribución en la red, lo cual se traduce en problemas de escasez, disminución de presiones y discontinuidad en el servicio de agua a los usuarios.

El déficit entre el caudal de agua disponible en la red y el caudal de agua requerido por los usuarios, se determina mediante la ecuación 3.4.

$$\text{Def}_{\text{sar}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{zs}}} \%_{z,i} \left(\frac{Q_{s,i} - Q_{\text{req},i}}{Q_{\text{ts}}} \right) \quad (3.4)$$

Donde:

Def_{sar} = Déficit promedio en el caudal de agua disponible en la red y el caudal de agua requerido por los usuarios (\pm %)

$Q_{s,i}$ = Caudal de agua suministrado a la red de una zona de servicio, i (l/s)

$Q_{\text{req},i}$ = Caudal requerido por los usuarios en una zona de servicio, i (l/s)

Q_{ts} = Caudal total suministrado a toda la red de distribución (l/s)

$\%_{z,i}$ = Porcentaje que representa una zona de servicio i , de la suma total de las zonas de servicio

n_{zs} = Número de zonas de servicio

El valor resultante es negativo si existe un déficit de suministro de agua en general en la red, y es positivo si en el sistema hay un superávit.

3.1.5 Presión media del agua en la red de distribución

La presión media de la red se obtiene con los registros de las mediciones de campo especificadas en la sección 1.2.1 de este Manual. Los datos de campo se promedian aplicando la ecuación 3.5.

$$p_{\text{med}} = \frac{\sum_{j=1}^{m_p} p_j}{m} \quad (3.5)$$

Donde:

p_{med} = Presión media del agua en la red de distribución (kg/cm²)

p_j = Presión en el j ésimo punto de medición en campo (kg/cm²)

m_p = Número de puntos de medición de presión

m = Número de registros de presión realizados

3.1.6 Elaboración del diagnóstico de eficiencia hidráulica

La elaboración del diagnóstico de eficiencia hidráulica de un sistema de distribución de agua potable se conforma por cinco actividades:

- La identificación de las características de la población.
- La descripción del funcionamiento actual del sistema de agua potable.
- La actualización de los planos de la red.
- El cálculo de consumos, dotación y gastos de operación.
- El cálculo del balance volumétrico de la red actual.

A continuación se detalla cada una de estas partes del diagnóstico de eficiencia hidráulica del sistema de abastecimiento.

3.1.6.1 Características de la población

En un diagnóstico de eficiencia hidráulica es importante estimar el número de habitantes servidos por el sistema de abastecimiento de agua potable y la cobertura de la red de distribución.

El número de habitantes servidos se calcula multiplicando el índice de hacinamiento de la localidad, por el número de tomas domésticas conectadas a la red de distribución de agua.

La cobertura del servicio se obtiene dividiendo el número de habitantes servidos, entre el número de habitantes totales de la localidad.

Cabe mencionar que los datos de población son muy discutidos por los técnicos, ya que en ocasiones existen discrepancias significativas entre los valores oficiales del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), el Consejo Nacional de Población (CONAPO), la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el propio organismo operador. No obstante, es necesario analizar las

inconsistencias con mucho cuidado; por ejemplo, una vivienda deshabitada o un lote baldío con una toma domiciliaria conectada a la red, es descartada por INEGI en el conteo de habitantes, en cambio el organismo operador puede contabilizarla si no ha confirmado que ahí no vive nadie. También, pueden cometerse errores frecuentes al considerar tomas domiciliarias domésticas, que en realidad son de uso comercial.

Lo conveniente en estos casos es realizar la vinculación de tomas domiciliarias (sección 1.2.10 del Manual) y extrapolar los resultados para obtener los datos de la población servida.

3.1.6.2 Descripción del sistema y su operación

Una vez recopilada y analizada la información en el organismo operador, se puede proceder a documentar la forma en que funciona el sistema de agua potable.

Para describir la operación de un sistema de agua potable se recomienda obtener la siguiente información:

- a) Origen de las extracciones de agua, fuentes y captaciones, ubicación y gastos de producción.
- b) Trayectoria, longitud, diámetro y tipo de material de las conducciones, estructuras accesorias, capacidad hidráulica, protecciones antiarriete y válvulas de aire y desfogue existentes.
- c) Ubicación de tanques de regulación y rebombes, capacidad, dimensiones y tipo de material con el que están contruidos.
- d) Configuración de la red de distribución con diámetros de tuberías, longitudes, tipo de material, válvulas y ubicación de elementos que la conforman.
- e) Proceso de operación actual del sistema de agua potable, zonas de servicio e influencia, movimientos de válvulas, encendido y apagado de pozos y rebombes, horarios de operación y atención de situaciones de emergencia.
- f) Investigación de obras en proceso de construcción a corto plazo.
- g) Situación del sistema de macromedición.
- h) Condiciones del programa de control de fugas, estadísticas, equipos y métodos.
- i) Características del sistema de micromedición.

Es recomendable acompañar la descripción del sistema de agua potable con fotografías de cada estructura; croquis de localización de captaciones y obras del sistema; diagramas de conducciones indicando caudales y

dirección del flujo de agua; croquis de los detalles de fontanería de los pozos, cárcamos, rebombes y tanques; tablas con valores de capacidad de tanques, pozos y cárcamos de rebombeo y datos de placa de los equipos de bombeo; gráficas porcentuales de ocurrencia de fugas, coberturas de macro y micromedición y clasificación de tomas domiciliarias; planos de áreas y horarios de servicio, áreas de influencia de tanques y rebombes, y de distribución de presiones en la red.

En ocasiones, el organismo operador cuenta con proyectos para ampliar o rehabilitar la red de agua potable a corto plazo, por lo que es importante describirlos en el diagnóstico de eficiencia física para integrarlos en el proyecto de eficiencia hidráulica.

Finalmente, es de suma importancia incluir los planes de crecimiento que tenga considerado el organismo operador, ya que de esta manera podrán ser tomados en cuenta.

3.1.6.3 Actualización de los planos de la red

El catastro de la red tiene por objeto dejar evidencia gráfica del estado físico que guarda la red de abastecimiento y de la operación hidráulica, con información actualizada, confiable y organizada de manera adecuada.

El catastro de la red se conforma por una serie de planos y fichas técnicas, que sirven para ubicar los elementos de la red, así como para referir el estado y características físicas como son: la topología de la red, el tipo de material, el diámetro de tuberías, simbologías, ubicación de obras de captación, válvulas, tanques, rebombes, potabilizadoras, etc.

Aunque lo deseable es que los planos y fichas técnicas del catastro se encuentren actualizadas y tengan datos confiables, no siempre ocurre esto, por lo que es necesario analizar si la información servirá para los fines que se persiguen en un proyecto de eficiencia hidráulica. Es necesario entonces, verificar que los planos de red tengan las siguientes características:

- a) Es preferible que el plano se encuentre digitalizado con algún software de dibujo, tal como AutoCad o Microstation; cuando solo se disponga de una versión impresa de los planos, deberán digitalizarse con este tipo de herramientas.
- b) La traza de las calles y colonias de la localidad donde se dibuja la red de tuberías deben estar actualizadas. El INEGI dispone de planos catastrales de las localidades del país que pueden adquirirse a bajo costo.

- c) El plano debe estar georeferenciado y escalado; es decir, sus coordenadas deben estar referenciadas a las coordenadas geográficas universales reales de la localidad.
- d) Si el plano está en versión digital, deberá estar depurado en cuanto a los *layers* o capas, dejando únicamente aquellas que son necesarias y con los elementos que comparten características similares.
- e) En el caso de que existan proyectos de nuevos desarrollos o ampliaciones de la red de agua potable, resulta importante que el organismo operador proporcione los planos correspondientes con la finalidad de incorporarlos al plano de la red.
- f) En cuanto a los planos de las líneas de conducción que parten desde las fuentes de abastecimiento, se requieren los perfiles topográficos a lo largo de su trazo, señalando las estaciones a cada 0.50 a 2.00 metros con sus elevaciones.
- g) Las válvulas de seccionamiento y de control automático se deben ubicar en los planos, señalando si se encuentran abiertas, cerradas o parcialmente abiertas, y anotando sus valores de calibración.
- h) Se debe utilizar una capa o *layer* para dibujar las zonas de influencia de tanques, áreas y horarios de servicio.
- i) Es necesario dibujar los crucesos y detalles de piezas especiales en planos de detalle.
- j) Se deben elaborar fichas técnicas de la fontanería a detalle de tanques y rebombesos.

Es importante que la red de abastecimiento tenga simbologías y un *layer* para cada elemento hidráulico que permita su identificación dentro del plano. En la figura 3.1 se muestra un ejemplo del trazo de la red; los círculos rellenos representan válvulas de seccionamiento abiertas y cerradas, las tuberías de distribución se presentan de color azul y las de conducción de rojo, los arcos en las tuberías indican que no existe interconexión entre ellas y las flechas indican el sentido del flujo en las tuberías de llegada y salida de tanques.

El plano de la red de agua potable debe contener e indicar el alcance de las zonas de influencia de las captaciones de abastecimiento, sea un pozo o tanque o rebombeo, como se muestra en la figura 3.2.

Figura 3.1 Ejemplo de trazo de una red de abastecimiento

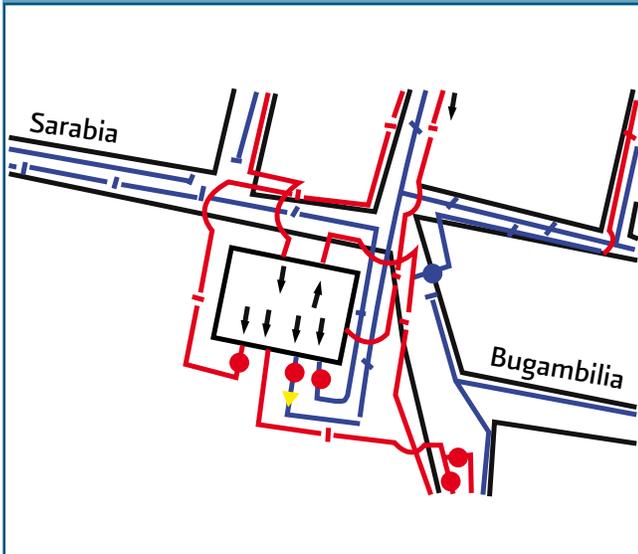
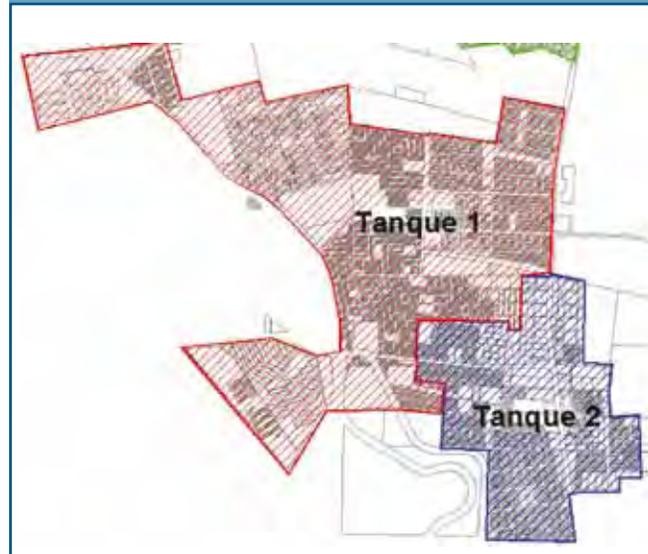


Figura 3.2 Ejemplo de zonas de influencia de fuentes de abastecimiento



Los organismos operadores que tengan un servicio intermitente o tandeado deben plasmar en el plano su programa de horarios de servicio así como un esquema de las zonas de tandeo, ver figura 3.3.

La información de la infraestructura hidráulica de la

red contenida en los planos como son tanques, rebom-
beos, pozos, plantas potabilizadoras, etc., requieren el
detalle del despiece de la fontanería de las interconexio-
nes de las tuberías. En la figura 3.4 se muestra una ficha
técnica del levantamiento de un tanque.

Figura 3.3 Ejemplo de zonas y horarios de servicio de agua

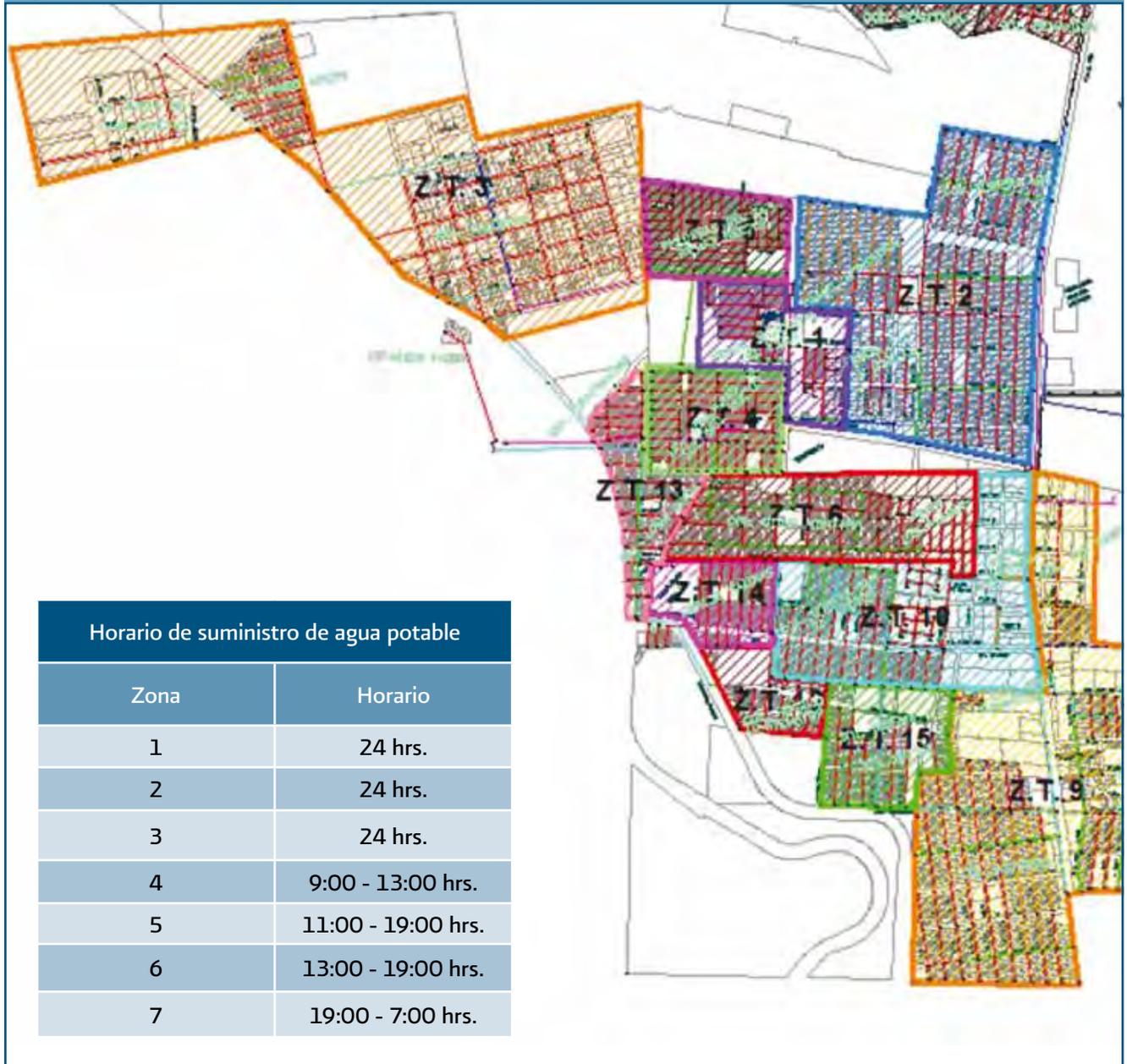
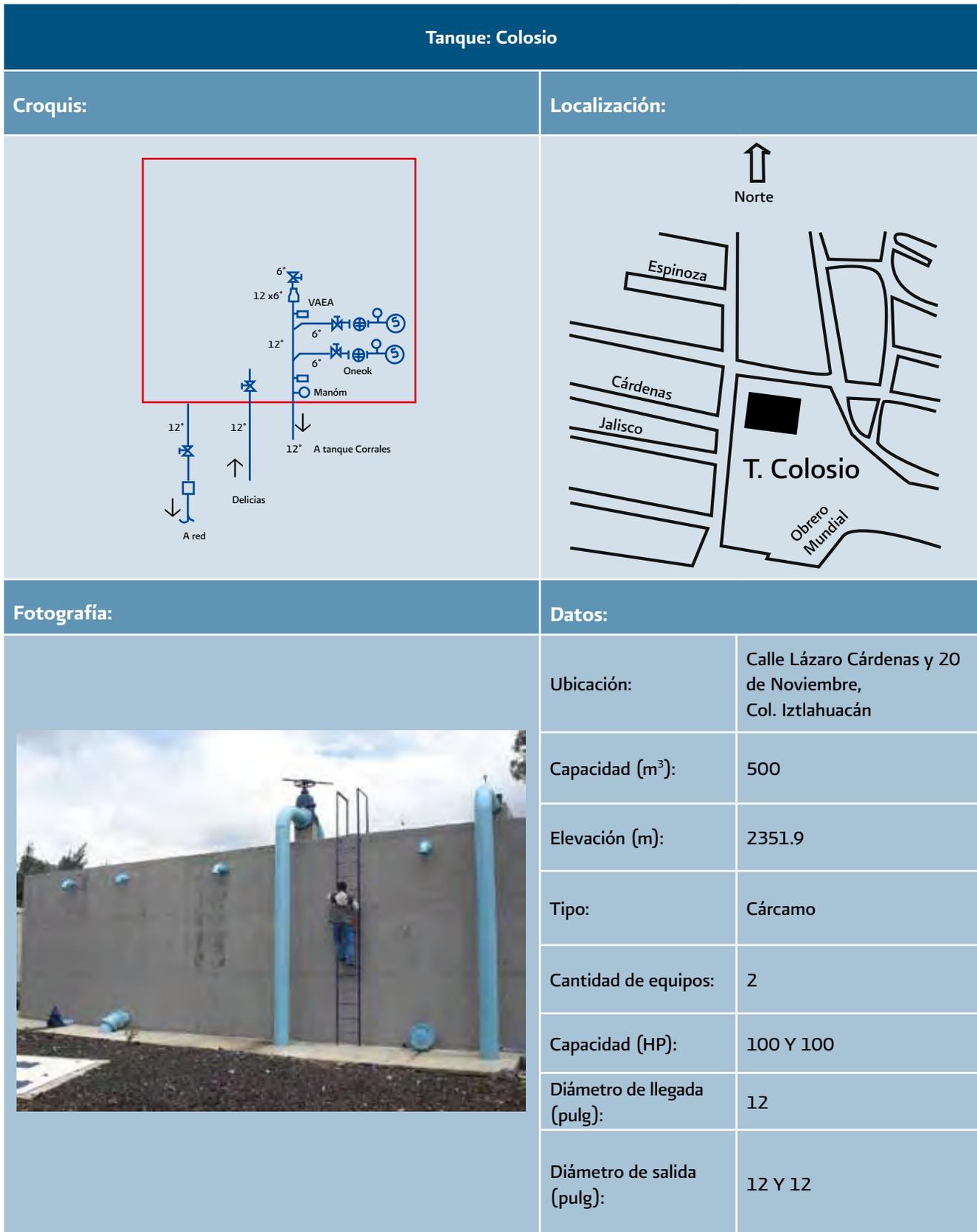


Figura 3.4 Ejemplo de un levantamiento de fontanería de tanques



En las redes de abastecimiento es importante conocer el despiece a detalle de los cruceros de las piezas especiales, así como el estado en que se encuentran las válvulas, ya que estos elementos son muy importantes en un sistema para el control del flujo. En la sección 1.2.8 del Manual se indica el procedimiento para realizar esta actividad.

El procedimiento para llevar a cabo la actualización de los planos de un sistema de agua potable es el siguiente:

- 1) Se realiza una revisión de los planos con los que disponga el organismo operador con el fin de ubicar las tuberías que no se encuentran digitalizadas y se actualizan las modificaciones que ha tenido la red de agua potable hasta la fecha.
- 2) Se confrontan los planos existentes con las imágenes satelitales para confirmar su nivel de georeferenciación. Asimismo, se analizan los detalles de la traza catastral de la ciudad para comprobar que se encuentra actualizada y georeferenciada. En caso de que no sea adecuada, se procederá a redibujar toda la red en una cartografía reciente.
- 3) Se realizan entrevistas con el personal de operación y mantenimiento y se hacen recorridos de campo específicos, para verificar detalles físicos y actualizarlos en los planos.
- 4) Se hace una depuración de las capas o *layers* para optimizar el manejo del plano digital.
- 5) Finalmente, con el apoyo de los resultados de la inspección física de cajas de válvulas se interpretan los trazos dudosos de la red de distribución y se afinan detalles en los cruceros.

Los planos actualizados del catastro de la red de agua potable se presentan dibujados a escala 1:2000. Se incluye el croquis de localización que indica la localidad con todas sus vías de comunicación, así como su orientación y coordenadas geográficas obtenidas de las cartas DETENAL que publica el INEGI.

La red se dibuja de acuerdo con la simbología especificada en el Manual de Diseño de Agua Potable y Alcantarillado (MAPAS), Libro II, 1ª Sección, tema 1.4 "Redes de distribución" editado por la CONAGUA. En los cruceros se anota la cota topográfica y en las tuberías se apunta el valor del diámetro y longitud. También, se indican la ubicación de las válvulas de control, los datos técnicos actuales y la simbología respectiva. Se elabora otro plano con el detalle de los cruceros de la red y de

la fontanería de tanques y trenes de descarga de pozos. El tamaño de los planos normalmente es de 90 por 60 centímetros.

Cuando un solo plano no sea suficiente para contener la totalidad de la red actual, debe elaborarse el número de planos para impresión que sea necesario, indicando en forma esquemática un mosaico que muestre achurado el plano del que se trata.

Los planos se tendrán que elaborar en formato digital y deberán cumplir con el formato y configuración establecida por el organismo operador respectivo.

3.1.6.4 Cálculo de consumos, dotación y gastos de operación

En un diagnóstico de eficiencia hidráulica de un sistema de agua potable, es necesario calcular los consumos, dotación y gastos de operación y diseño, con la finalidad de conocer la disponibilidad hidráulica de las obras de captación y los requerimientos de los usuarios del sistema de abastecimiento de agua potable.

En este sentido, interesa conocer los valores para las condiciones actuales y estimar las condiciones requeridas.

Los consumos unitarios y las dotaciones se obtienen con los procedimientos indicados en las secciones 3.1.1 y 3.1.2 del Manual, respectivamente.

El gasto de operación medio anual en condiciones actuales se determina sumando todos los caudales medios producidos en las captaciones del sistema de agua potable. Cuando el clima de la localidad en estudio tiene variaciones extremas en verano e invierno, es importante determinar el gasto medio de operación para cada temporada. La división del gasto mayor entre el menor, es igual al coeficiente de variación máximo diario del sistema.

Para estimar el déficit o el superávit en la producción del agua para el sistema de abastecimiento, el resultado del gasto medio disponible debe ser comparado con el caudal medio requerido por los usuarios. Este dato es muy importante en el momento de elaborar el proyecto de eficiencia hidráulica, puesto que de ello se derivarán las estrategias para mejorar el sistema de distribución de agua potable.

El caudal medio requerido por los usuarios se determina fijando la dotación que debería existir en el sistema de abastecimiento en condiciones de plena satisfacción de los usuarios y aplicar la ecuación 3.6.

$$Q_{\text{medreq}} = \frac{\text{Dot}_{\text{req}} * n_{\text{serv}}}{86400} \quad (3.6)$$

Donde:

- Q_{medreq} = Gasto medio requerido actual (l/s)
 Dot_{req} = Dotación actual requerida para satisfacer adecuadamente a los usuarios (l/hab/día)
 n_{serv} = Número de habitantes servidos en el sistema de agua potable

La dotación actual requerida, Dot_{req} , se determina considerando el nivel de fugas actual obtenido en el diagnóstico de eficiencia física (sección 2.1 del Manual) y aplicando la ecuación 3.7.

$$\text{Dot}_{\text{req}} = \frac{\text{Cu}_d + \text{Cu}_{\text{nd}}}{1 - \frac{\% \text{fugas}}{100}} \quad (3.7)$$

Donde:

- Cu_d = Consumo unitario doméstico requerido para satisfacer adecuadamente a los usuarios (l/hab/día)
 Cu_{nd} = Consumo unitario no-doméstico, calculado con la ecuación 3.8 (l/hab/día)
 $\% \text{fugas}$ = Fugas potenciales en el sistema de distribución (%)

$$\text{Cu}_{\text{nd}} = \frac{C_{\text{No-domestico Medido}} + C_{\text{No-doméstico cuota fija}} + C_{\text{No-doméstico mal medido}} + C_{\text{No-doméstico adicionales}}}{n_{\text{servida}}} \quad (3.8)$$

El consumo unitario doméstico requerido para satisfacer adecuadamente a los usuarios, se obtiene de los datos recomendados por la CONAGUA, que están en la tabla 3.1.a de este Manual.

3.1.6.5 Cálculo del balance volumétrico de la red actual

El balance volumétrico es una herramienta que presenta las características de demanda, suministro y tipo de distribución de un sistema de agua potable en un esquema numérico sencillo y que facilita su visualización.

El principal objetivo de este balance volumétrico es evaluar el desequilibrio entre el gasto disponible y el consumo demandado por la población que existe en zonas de servicio bien delimitadas, tomando en cuenta características específicas de cada una como dotación, presencia de grandes consumidores, tipo de distribución, entre otras.

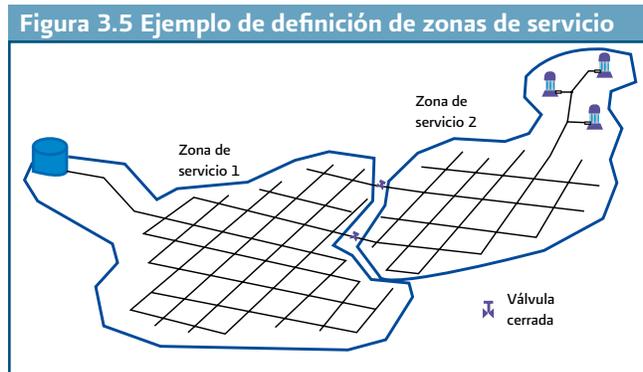
El balance volumétrico se desarrolla en cuatro pasos:

1. Se delimitan zonas de servicio en la red.
2. Se define el gasto disponible en cada zona y su tipo de funcionamiento.
3. Se calcula el número de usuarios domésticos dentro de cada zona.
4. Se determina el desequilibrio correspondiente.

Paso 1 Delimitación de zonas de servicio actuales

El número total de zonas de servicio se define considerando las características de operación actual del sistema de agua potable y el criterio del analista. Para disminuir el efecto-criterio-tendencia del analista, se recomienda seguir los siguientes lineamientos:

- a) Procurar que cada zona de servicio corresponda a sólo un tanque de regulación, rebombero, pozo o grupo de pozos con una conducción común. Un mayor número de zonas de servicio ofrece la posibilidad de considerar con mayor detalle las diferentes características de operación y demanda de cada una de ellas (figura 3.5).



- b) Cuando existen dos o más puntos de conexión entre dos posibles zonas de servicio y los mismos operan generalmente abiertos, se deben de considerar ambas como una sola zona.
- c) Es conveniente evitar la definición de zonas de servicio compuestas, ya que el análisis de su comportamiento para efectos del balance volumétrico se vuelve complicado. En la operación diaria de un sistema es también complicada la predicción del funcionamiento de una zona con estas características.

Paso 2 Análisis de la disponibilidad de agua en las zonas de servicio actuales

La disponibilidad de agua en cada una de las zonas de servicio se define de acuerdo al tipo de captaciones de suministro de la siguiente manera:

- a) **Zona de servicio con pozo inyectando directamente a la red.-** El gasto disponible corresponde al gasto de diseño del pozo. Para las zonas alimentadas con dos o más pozos inyectando directamente a la red, el gasto disponible se definirá como la suma de los gastos de diseño de los pozos. Se recomienda la verificación del gasto que produce el pozo en campo. El gasto disponible será el máximo que resulte durante la operación del pozo con las válvulas de su tren de descarga abiertas completamente.

- b) **Zona de servicio a partir de un tanque de regulación.-** El gasto disponible para este tipo de zona corresponde al gasto medio que ingresa al tanque de regulación. Para estimar su valor, en caso de no contar con un macromedidor en las tuberías de ingreso al tanque, se realizarán mediciones durante 24 horas y se calculará un gasto medio de ingreso, de acuerdo con los procedimientos de la sección 1.2.3 del Manual. Cuando el tanque es alimentado directamente desde un pozo o zona de pozos, sin entrega de agua en ruta de la conducción, el gasto disponible en la zona corresponderá a la suma de los gastos de extracción en los pozos.

- c) **Zona de servicio a partir de un rebombero alimentado con un tanque de regulación.-** El gasto disponible se definirá de la misma manera que en las zonas con tanque de regulación, pero deberá además verificarse que la capacidad máxima del sistema de rebombero pueda cubrir por lo menos el gasto máximo horario calculado a partir del gasto medio de ingreso al tanque.

- d) **Zona de servicio a partir de un rebombero en línea tipo booster.-** Para considerar como válida una zona de servicio de este tipo es primordial asegurar que siempre se tenga el mismo gasto disponible a la entrada del rebombero, lo cual en general no se cumple ya que estos equipos se encuentran casi siempre conectados a alguna tubería de una red de distribución de otra zona de servicio. En este caso, se recomienda que la zona abastecida por el rebombero se considere como parte de la zona de servicio anterior al mismo. Cuando este tipo de rebombero se encuentra como derivación de una línea de conducción principal, el gasto disponible se definirá como el máximo que resulte de su operación con las válvulas en su tren de descarga completamente abiertas.

- e) **Zonas de servicio compuestas.-** Como se comentó anteriormente, el funcionamiento de estas zonas es complicado, por lo que para su análisis se considera que toda la zona de servicio es alimentada a partir de un tanque de regulación. Esta simplificación implica que el gasto disponible será la suma de los siguientes gastos: el gasto medio diario real de ingreso al tanque, obtenido de la misma manera que para las zonas de servicio de este tipo; y el 65% del gasto máximo de operación del pozo o pozos que se encuentren inyectando directamente a la red.

Se recomienda que toda la información generada sobre gastos disponibles se anote en una tabla como la 3.2.

Tabla 3.2 Ejemplo de formato de disponibilidad de agua por zona de servicio actual

Zona de servicio	Captación	Gasto disponible (l/s)	Gasto disponible total (l/s)	Tipo de distribución
Zona 1	Pozo 1	10.00	10.00	Directa
Zona 2	Pozo 2	15.00	37.00	Directa
	Pozo 3	22.00		
Zona 3	Pozo 4 - Tanque 1	10.00	10.00	Regulada
Zona 4	Pozo 4 - Tanque 2	12.00	25.00	Regulada
	Pozo 5 (20 l/s * 65 %)	13.00		
Sumas		82.00	82.00	

Paso 3 Distribución espacial de los usuarios

Con base en el padrón de usuarios se define el número de usuarios domésticos conectados a la red dentro de cada una de las zonas de servicio propuestas. Cuando en la información entregada por el departamento comercial, el padrón de usuarios no se encuentra relacionado directamente con las zonas de servicio se pueden utilizar métodos alternativos considerando los detalles de cada usuario con que cuente el padrón, por ejemplo su colonia o ruta de cobro, cuando la segunda se encuentra bien delimitada en espacio.

Cuando una misma colonia o ruta de cobro pertenezca a dos o más zonas de servicio, deberá estimarse el número de usuarios que corresponde a cada una de ellas de acuerdo con el mejor criterio disponible. El más sencillo es por porcentaje de área correspondiente. En este análisis se puede considerar la ubicación de grandes consumidores industriales dentro de su zona de servicio correspondiente. La información obtenida de este análisis se colocará en una tabla como en la tabla 3.3.

Tabla. 3.3 Ejemplo de formato de distribución espacial de usuarios

Zona de servicio	Colonia	Usuarios domésticos
Zona 1	Colonia A	350
	Colonia B	140
Zona 2	Colonia C	210
	Colonia D	320
Zona 3	Colonia E	170
	Colonia F	540
Zona 4	Colonia G	335
	Gran consumidor 1	1
Sumas		2 066

Paso 4 Cálculo del balance volumétrico actual

El balance volumétrico se evalúa en las condiciones más desfavorables de la operación normal, las cuales se presentan durante los días más calurosos del año en las horas de máxima demanda. Para calcular estas condiciones se tomarán en cuenta la dotación, índice de hacinamiento y coeficientes de variación, calculados como se indica en la sección 3.1.6.1, 3.1.6.4 y 1.2.3, respectivamente.

El balance volumétrico se presentará de manera similar como se muestra en la tabla 3.4, en la cual se resumen los análisis de disponibilidad de agua y distribución espacial de usuarios, se calcula el gasto requerido de acuerdo a su tipo de distribución y se evalúa el desequilibrio de cada zona de servicio. Para el ejemplo presentado en esta tabla 3.4, se utiliza una dotación supuesta de 375 l/hab/día y un índice de hacinamiento de 4.5.

Tabla 3.4.A Ejemplo de formato de balance volumétrico

Zona de servicio	Colonia	Usuarios	Población (habitantes)	Gasto medio (l/s)	Gasto medio (l/s)
Zona 1	Colonia A	350.00	1575.00	6.84	9.57
	Colonia B	140.00	630.00	2.73	
Zona 2	Colonia C	210.00	945.00	4.10	13.67
	Colonia D	320.00	1440.00	6.25	
	Colonia E	170.00	765.00	3.32	
Zona 3	Colonia F	540.00	2430.00	10.55	10.55
Zona 4	Colonia G	335.00	1508.00	6.55	16.55
	Gran consumidor 1	1.00	0.00	10.00	
Sumas		2066.00	9293.00	50.33	50.33

Tabla 3.4.B Ejemplo de formato de balance volumétrico (continuación)

Zona de servicio	Fuentes	Gasto disponible (l/s)	Distribución	Gasto requerido (l/s)	Diferencia (l/s)
Zona 1	Pozo 1	10.00	Directa	20.77	-10.77
Zona 2	Pozo 2	37.00	Directa	29.67	7.33
	Pozo 3				
Zona 3	Pozo 4 - Tanque 1	10.00	Regulada	14.77	-4.77
Zona 4	Pozo 4 - Tanque 2	25.00	Regulada	23.16	1.84
	Pozo 5				
Sumas		82.00		88.36	-6.36

En el cálculo del balance volumétrico, el gasto requerido depende del tipo de distribución, de tal manera que para zonas de servicio con inyección directamente a la red se calcula de acuerdo a la fórmula 3.9 y para zonas reguladas se calcula con la fórmula 3.10.

$$Q_{req\,directa} = Q_{med} \times CVMD \times CVMH \quad (3.9)$$

$$Q_{req\,regulada} = Q_{med} \times CVMD \quad (3.10)$$

Donde:

Q_{med} = Gasto medido (l/s)

Q_{req} = Gasto requerido (l/s)

CVMD = Coeficiente de variación máxima diaria

CVMH = Coeficiente de variación máxima horaria

La diferencia se calculará en cada zona restando al gasto disponible el gasto requerido, cuyo valor es el déficit o superávit en la zona en cuestión.

3.2 Proyecto de eficiencia hidráulica

El proyecto de eficiencia hidráulica tiene como objetivo, realizar una redistribución de presiones y caudales en la red de distribución de un sistema de abastecimiento de agua potable, para optimizar su funcionamiento y ahorrar agua; facilitar las labores de mantenimiento y control de fugas; aprovechar las oportunidades de ahorro de energía; y ampliar la cobertura del servicio.

La característica principal de un proyecto de eficiencia hidráulica, a diferencia de un proyecto tradicional hidráulico, es la de lograr este objetivo utilizando los mismos recursos que se aplican actualmente.

El diseño de la red en sectores es un esquema que permite alcanzar este objetivo con cierta rentabilidad y relativa rapidez, pero esta sectorización deberá estar conformada con base en un análisis hidráulico de alto nivel, aplicando simuladores hidráulicos de redes de agua potable, utilizando tecnología de punta sobre sistemas de control automático y medición.

Actualmente, en México se maneja indistintamente la sectorización de redes y los distritos hidrométricos; sin embargo, no es lo mismo. De hecho un sector puede contener varios distritos hidrométricos dentro de su área.

Los distritos hidrométricos son elementos que se aíslan hidráulicamente con movimientos de válvulas en forma temporal, para realizar pruebas de consumos, detectar fugas y evaluar eficiencia física. Su diseño se basa en especificaciones concretas, para que las pruebas en campo resulten confiables; así por ejemplo, se maneja un número de usuarios, con la idea de que en la medición de los caudales registrados en la entrada del distrito no se tengan errores significativos; o bien, el distrito puede tener una o varias entradas o salidas, y puede estar abasteciendo a otros distritos, puesto que no se altera de ningún modo la prueba en turno.

En cambio la sectorización de redes agua potable tiene otra connotación en su diseño, ya que se trata de formar elementos separados físicamente unos de otros, interconectados hidráulicamente solo mediante líneas de conducción o circuitos primarios de la red que entreguen el agua en bloque. Así, el diseño de cada sector obedece más a la topografía de la ciudad; a la ubicación y capacidad hidráulica de las captaciones, rebombes, tanques, conducciones y tuberías; a los valores de demanda de agua de los usuarios; y no a simples especificaciones de

dibujo. Los sectores deben analizarse y diseñarse hidráulicamente en forma integrada, considerando el mínimo de cortes, conexiones, movimientos de válvulas e instalaciones de tuberías. Los sectores tienen forma irregular y el número de usuarios dentro de él, depende de la disponibilidad del agua y de la infraestructura existente.

El proyecto de eficiencia se desarrolla en forma similar al proyecto de un sistema de agua potable tradicional. Igualmente, hay que definir la dotación y gastos de diseño (secciones 3.1.1 a 3.1.5 del Manual), hacer una proyección de la demanda de agua en el tiempo, y considerar las zonas de crecimiento de la mancha urbana.

Sin embargo, en los proyectos de sectorización y eficiencia hidráulica hay que tener en cuenta que varios de los parámetros de diseño tradicionales cambian o se simplifican o no aplican. Por ejemplo, el periodo de diseño es corto, del orden de uno o dos años, debido a que pierde sentido la proyección a mediano plazo, por tratarse precisamente de elevar la eficiencia del sistema de manera rápida. Otra situación es que en el proyecto tradicional se promueve casi siempre la construcción de nueva infraestructura; en cambio, en el proyecto de eficiencia se busca aprovechar al máximo la infraestructura existente.

Para la elaboración del proyecto de eficiencia hidráulica es necesario primero realizar un diagnóstico con los procedimientos señalados en la sección 3.1.6 de este Manual. Con ello, se define la población del proyecto, se define el funcionamiento del sistema de abastecimiento actual, se actualizan los planos de la red y se determina el desequilibrio espacial entre el agua suministrada y la demandada por los usuarios por cada zona de la ciudad.

Después de obtener el diagnóstico, se realizan los siguientes procesos para elaborar e implementar el proyecto de eficiencia hidráulica de un sistema de agua potable:

- a) Conformación de los nuevos sectores para redistribuir los caudales y presiones.
- b) Elaboración del modelo de simulación hidráulica de la red.
- c) Análisis y diseño hidráulico de la red sectorizada.
- d) Análisis y diseño hidráulico de conducciones para entrega de agua en bloque.
- e) Puesta en marcha del proyecto de sectorización.

Se recomienda que estos procesos se ejecuten en la secuencia en que fueron descritos para lograr mejores resultados en el proyecto.

También, se recomienda aplicar las técnicas y criterios descritos en el documento sobre sectorización publicado por la Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento de la CONAGUA.

3.2.1 Conformación de sectores para redistribución de caudales y presiones en la red

Un sector es una porción de la red de distribución bien delimitada geográficamente, la cual cuenta con una fuente de abastecimiento definida y con capacidad suficiente para cubrir la demanda de los usuarios y sus variaciones en el tiempo. A continuación se presentan las etapas para definir la conformación de sectores.

3.2.1.1 Consideraciones para la propuesta de sectores

Se recomienda que la propuesta inicial de sectorización se base en las zonas de servicio actuales, ajustando aquellas que se encuentren desequilibradas y respetando en medida de lo posible la operación de las zonas equilibradas y con un buen funcionamiento.

El tamaño de los sectores estará limitado únicamente por el gasto disponible de las captaciones de abastecimiento y de la capacidad de regulación de los tanques. No existe límite mínimo ni máximo preestablecido en cuanto al número de usuarios, área o longitud de red.

El uso de tanques de regulación para la distribución aumenta el número de usuarios que puede cubrir el gasto medio de una captación, por lo que se recomienda su rehabilitación y puesta en marcha cuando estén fuera de servicio.

Se recomienda evitar las inyecciones directas a red desde pozos. Si existe un tanque de regulación cercano y con suficiente capacidad es preferible proponer la distribución a través del mismo.

Es posible encontrar sectores que después de varias iteraciones no se puedan equilibrar debido al poco gasto disponible o a una pequeña o nula capacidad de regulación del sector. En estos casos se puede justificar la proyección de infraestructura nueva, como la construcción de un tanque de regulación o, en el peor de los casos, de una captación nueva.

La capacidad de la red de distribución para cubrir la demanda, tanto de caudal como de presión en cada sector propuesto, debe ser evaluada con un modelo de simulación. Si el resultado de esta evaluación indica que en algún sector la capacidad de la red es insuficiente, o que es muy complicada la regulación de presiones, se puede modificar la sectorización propuesta.

La capacidad de las líneas de conducción primaria que entregan el agua en bloque a los sectores propuestos será analizada también con el modelo de simulación.

3.2.1.2 Redistribución de caudales en el sistema

La redistribución de caudales propone sectores hidráulicos que suplirán las zonas de servicio actuales. El proceso es iterativo. Para comenzar es necesario proponer una sectorización y evaluar su balance volumétrico con el formato de la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Ejemplo de formato de redistribución de caudales

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Sector hidráulico	Captación	Gasto disponible (l/s)	Colonias	Usuarios domésticos	Población (habitantes)	Gasto medio (l/s)	Suma Gasto medio (l/s)	Tipo de distribución	Gasto requerido (l/s)	Desequilibrio (l/s)
Sumas										

Utilizando el formato de la tabla 3.5, se propone la primera sectorización aplicando el siguiente procedimiento:

- 1) Columna 1. Se propone un sector identificando la fuente de distribución principal (nombre del tanque o del pozo que inyecta a la red).
- 2) Columna 2. Se identifica la captación o captaciones de abastecimiento (pozos, manantiales, presas, etc.) que inyectan al tanque o directamente a la red.
- 3) Columna 3. Utilizando el mismo criterio que en el balance volumétrico de la sección 3.1.6.5 del presente Manual, se determina el gasto disponible para el sector propuesto.
- 4) Columna 4. Se proponen las colonias o zonas identificadas de población, que serán abastecidas en este sector.
- 5) Columna 5. En esta columna se ingresa el número de usuarios domésticos de cada colonia propuesta para el sector.
- 6) Columna 6. Se calculan los habitantes en cada colonia o zona de población multiplicando sus usuarios por el índice de hacinamiento.
- 7) Columna 7. Se calcula el gasto medio demandado por los habitantes utilizando la dotación de proyecto.
- 8) Columna 8. En esta columna se coloca la suma de los gastos medios de cada colonia o zona de población propuesta para el sector.
- 9) Columna 9. Se especifica el tipo de distribución que tendrá el sector. Puede ser a través de un tanque de regulación (regulada), inyección directa a red desde la fuente de abastecimiento (directa) o mixta.
- 10) Columna 10. Se calcula el gasto máximo que requerirá la población durante los meses más calurosos del año, tomando en cuenta su tipo de distribución, utilizando las fórmulas 3.9 y 3.10.
- 11) Columna 11. Se calcula el desequilibrio del sector propuesto con la fórmula 3.11.

$$\text{Desequilibrio} = \Sigma \text{Gasto disponible (3)} - \Sigma \text{Gasto requerido (10)}$$

(3.11)

Si existe un desequilibrio negativo en el sector (columna 11) se deberá disminuir el número de usuarios servidos o agregar alguna fuente de abastecimiento para aumentar el gasto disponible. Cuando la diferencia sea positiva y relativamente cercana a cero, se prosigue a la

definición del siguiente sector y se repiten los pasos para llenar las columnas 1 a la 11.

Todas las colonias y zonas de población deben quedar dentro de algún sector. Si la columna 11 del último sector muestra una diferencia negativa, los usuarios que se disminuyan de este sector o las fuentes que se agreguen para aumentar el gasto disponible pueden desequilibrar algún sector anterior, por lo que deberán de añadirse o sustraerse respectivamente a los sectores contiguos y calcular nuevamente sus características.

La validez de los sectores alimentados por tanques reguladores depende de que estos últimos tengan capacidad suficiente para regular las variaciones horarias de la demanda. El cálculo de esta capacidad se detalla más adelante.

Este proceso se debe repetir hasta que todos los sectores, así como el balance volumétrico de la sectorización propuesta, presenten una diferencia positiva y cercana a cero. Además, la operación propuesta de los sectores deberá de ser lo más sencilla posible y requerir un mínimo de infraestructura nueva.

3.2.1.3 Análisis de la capacidad de regulación de tanques por sector

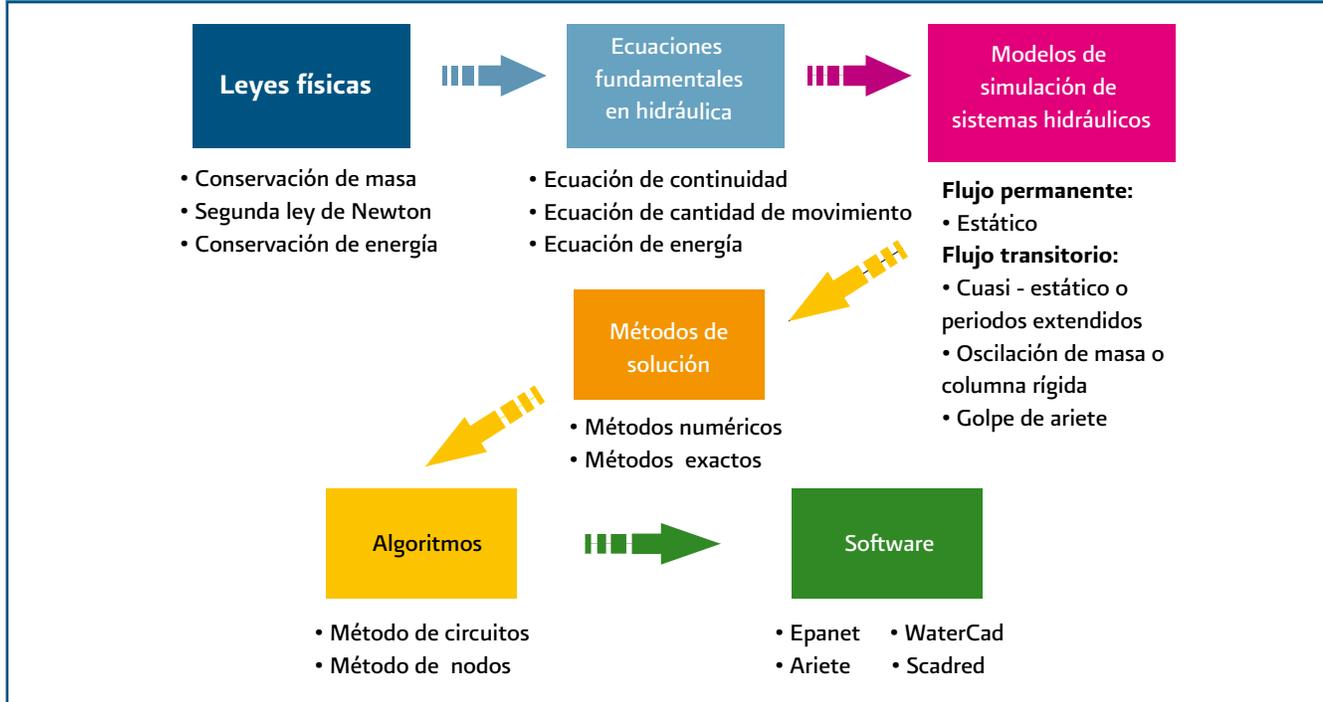
El procedimiento consiste en calcular el coeficiente de regulación en cada zona, utilizando la curva típica de demanda de agua (ver sección 1.2.3) y la política de suministro de agua hacia el tanque. La capacidad requerida de almacenamiento del tanque, en metros cúbicos, será determinada multiplicando dicho coeficiente de regulación por el gasto máximo diario del suministro.

El volumen resultante en el cálculo se compara con el volumen existente en el tanque de regulación. Si es mayor, el tanque tiene volumen suficiente para regular el gasto máximo horario y por lo tanto, el funcionamiento del sector propuesto es adecuado; en caso de que resulte menor, se propondrá prioritariamente disminuir el tamaño del sector, y en caso extremo, su ampliación cuando así lo permita la disposición de terreno y dinero.

3.2.2 Elaboración del modelo de simulación hidráulica de la red

Un modelo de simulación de una red de abastecimiento es una representación del funcionamiento hidráulico del

Figura 3.7 Fases de la modelación de los sistemas hidráulicos a presión



Las fases de la modelación de sistemas hidráulicos a presión se muestra en la figura 3.7, donde se observa que la modelación se basa en los principios básicos de la hidráulica: continuidad y cantidad de movimiento.

Así, la modelación hidráulica de redes de agua potable se realiza en flujo permanente o en periodos extendidos. Es decir, donde las variaciones de presión y velocidad son lentas en el tiempo y no se provocan efectos de aceleración en el flujo o elasticidad en la tubería y el fluido.

En la modelación de redes hidráulicas se aplican las dos leyes de Kirchoff, que son plasmadas en las ecuaciones 3.12 y 3.13.

$$\sum_{j=1}^m Q_{ij} + Q_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.12)$$

$$\sum_{j=1}^m \Delta H_j = 0 \quad (3.13)$$

Donde:

Q_{ij} = Gastos de las tuberías j , que entran y salen del nodo i (l/s)

Q_i = Gasto de demanda extraído de la red en el nodo i (l/s)

ΔH_j = Pérdida de carga en la tubería j (m)

Aplicando estas ecuaciones en cada tramo y nodo de la red, se obtiene un sistema de ecuaciones que debe resolverse simultáneamente, junto con las condiciones de frontera y a partir de una condición inicial, para obtener el valor de la carga hidráulica en cada nodo y la velocidad en cada tramo en condiciones de flujo permanente.

Las condiciones de frontera son relaciones conocidas de velocidad y presión en un punto de la red de distribución; algunos tipos de estas fronteras son las curvas características de bombas, ecuación de la descarga de agua por un orificio a la atmósfera, etc.

En cuanto a los consumos de los usuarios que se extraen por la tomas domiciliarias, se supone que en cada tramo del modelo todos ellos se concentran como extracciones en los nodos en forma proporcional a la longitud de la tubería representada o a áreas tributarias o a la densidad de usuarios.

Cuando se trata de modelación en periodos extendidos, se debe incluir una curva de variación horaria de la demanda en cada nodo con el fin de obtener las correspondientes variaciones de presiones y velocidades en la red.

Para conformar un modelo de simulación hidráulica se siguen los pasos siguientes:

- 1) Colocar un mapa de fondo de la traza urbana de la ciudad, sobre el que se montará el modelo de simulación. Este fondo debe estar georeferenciado y actualizado, de acuerdo con los lineamientos especificados en la sección 3.6.3 del Manual.
- 2) Dibujar el esqueleto de la red con todos sus elementos utilizando como base la traza de nodos y tramos.
- 3) Capturar los datos de cotas topográficas y demandas en los nodos.
- 4) Capturar los datos de diámetro, longitud y rugosidad en todos los tramos de tuberías.
- 5) Capturar los datos de los elementos frontera, tales como curvas de bombas, niveles de tanques, dimensiones de depósitos, etc.
- 6) Realizar corridas de prueba de funcionamiento del modelo.

Un punto importante es el ajuste de modelos de simulación hidráulica de redes de agua potable, para que reproduzca las condiciones reales. Los resultados del modelo pueden diferir de la realidad debido a errores o suposiciones en la conformación del modelo y/o en la elección de los datos capturados. En sí mismo el modelo de simulación no podrá dar soluciones exactamente iguales a los valores reales, ya que el modelo tiene hipótesis intrínsecas en las ecuaciones utilizadas para su elaboración. Algunos factores que alteran la veracidad de los valores arrojados por el modelo son:

- a) Errores en la rugosidad de las tuberías por su edad o material.
- b) Errores en los diámetros y longitudes de las tuberías por su desconocimiento en el plano.
- c) Suposiciones equivocadas en la asignación de demandas de agua en los nodos
- d) Existencia de fugas ocultas en la red.
- e) Errores en las caracterizaciones hidráulicas de accesorios (válvulas, codos, reducciones y ampliaciones de tubos).
- f) Errores en los datos de las curvas características de los equipos de bombeo.

Por lo tanto, todo modelo de simulación hidráulica de redes de agua potable debe ajustarse en lo posible a las condiciones reales, las cuales pueden ser monitoreadas con una campaña de medición utilizando los procedimientos de la sección 1.2 del presente Manual.

En el Manual de Diseño de Agua Potable y Alcantarillado (MAPAS), editado por la CONAGUA, puede consultarse con mayor profundidad los procedimientos para conformar un modelo hidráulico de red.

Actualmente, existen en el mercado nacional varios paquetes de cómputo que permiten conformar modelos hidráulicos de redes en ambientes gráficos y realizan el cálculo de las variables de presión y velocidad de manera rápida. Estas ventajas pueden ser ahora aprovechadas para mejorar los análisis de redes complejas como las de las grandes ciudades, reproduciendo todos los tramos y elementos de estas redes de agua potable. Esto conlleva a potenciar la cantidad de alternativas de operación que se pueden analizar en el sistema de abastecimiento y se logran resultados de configuraciones de la red con una operación eficiente. Dentro de todos estos programas de cómputo destaca el denominado *Epanet*¹³.

El *Epanet* es un programa que proporciona un entorno integrado bajo ambiente Windows para la edición de los datos de entrada a la red y la visualización de resultados en una amplia variedad de formatos. Entre éstos se incluyen mapas de la red codificados por colores, tablas numéricas, gráficas de evolución, mapas de isolíneas, entre otros. No existe límite en cuanto al tamaño de la red que puede procesarse y tiene amplia compatibilidad con el programa AutoCad para la visualización de la traza urbana como fondo y a escala real.

3.2.3 Análisis hidráulico de la red sectorizada

Una vez creado y calibrado el modelo de simulación de la red de agua potable, se utilizará como base para el análisis hidráulico de las condiciones propuestas de sectorización. Los pasos para el análisis hidráulico de la red sectorizada son:

- a) Definición de condiciones generales de análisis.
- b) Representación del esquema de sectorización.
- c) Optimización del funcionamiento de la red de distribución.

¹³Martínez F., 2002, *Epanet 2.0 en Español. Manual de Usuario*. Departamento de Ingeniería Hidráulica, UPV.

3.2.3.1 Definición de condiciones generales de análisis

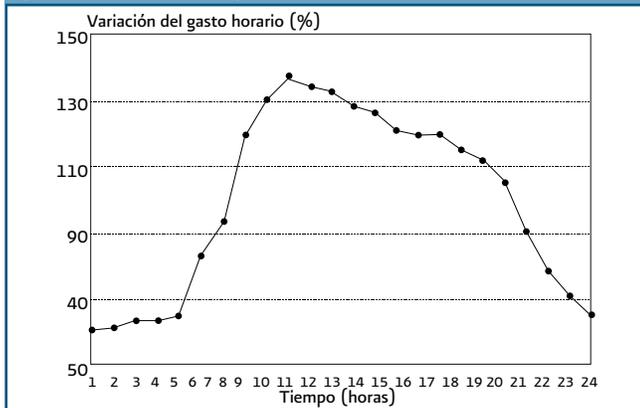
Las condiciones generales a definir son el periodo del análisis y la demanda base por nodo.

a) Periodo del análisis

Respecto al periodo del análisis, la red sectorizada se puede revisar en flujo permanente o en periodos extendidos de por lo menos 24 horas.

- **Análisis en flujo permanente.**- Cuando se analice por flujo permanente se deberán de modelar dos escenarios: el primero considerando que los usuarios consumen el gasto medio, y en el segundo, considerando el gasto máximo horario del día más caluroso del año. Con estos análisis se obtendrán resultados del comportamiento de la red en condiciones normales para evaluar zonas de alta presión, y en condiciones de demanda máxima para identificar zonas de baja presión.
- **Análisis en periodo extendido.**- Para este análisis se deberá definir una curva de variación de la demanda en cada nodo de consumo y las dimensiones de los tanques de regulación (ver sección 1.2.3 del Manual). En caso de no contar con curva de variación se utilizará la curva recomendada por la CONAGUA en su libro de Datos Básicos, 2007 del Manual de Diseño de Agua Potable y Alcantarillado (MAPAS), de acuerdo al tamaño de la población (ver figura 3.8). Con este tipo de análisis se puede evaluar el comportamiento del nivel en los tanques y la posibilidad de paros en hora punta.

Figura 3.8 Curva de variación de la demanda típica (Fuente: CONAGUA)

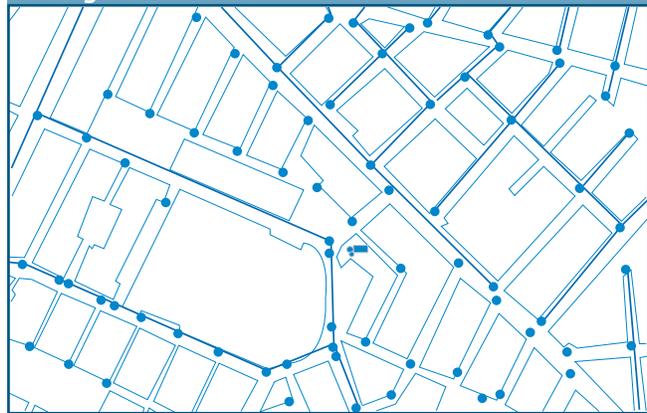


b) Demanda base por nodo

La demanda base de los nodos de consumo deberá representar las condiciones de la red sectorizada. La asignación de demanda a los nodos puede hacerse por los métodos tradicionales de área tributaria o longitud de tubería. En sectores donde la distribución de nodos es relativamente homogénea (figura 3.9) y considerando que la distribución de usuarios también lo es, la asignación de demanda puede realizarse por sector de acuerdo a la ecuación 3.14.

$$\text{Demanda x nodo} = \frac{\text{Dotación diseño} * \text{Población sector n}}{86400 * \text{No. de Nodos sector n}} \quad (3.14)$$

Figura 3.9 Ejemplo de sector con distribución de nodos homogénea



3.2.3.2 Representación del esquema de sectorización

Los cambios que se realicen en el modelo para representar el esquema de sectorización deben de ser identificados, etiquetados y cuantificados ya que se utilizarán para generar un catálogo de conceptos y volumetría para realizar las obras físicas de sectorización.

Los principales aspectos a representar son la definición y representación del esquema de entrega de agua en bloque, y la delimitación y aislamiento de sectores. Se recomienda realizar este proceso de manera ordenada, representando, aislando y verificando el funcionamiento de un sector a la vez.

a) Definición y representación del esquema de entrega de agua en bloque

Se debe diseñar un esquema de entrega de agua en bloque que asegure que cada fuente de abastecimiento funcione de acuerdo a la redistribución de caudales propuesta. El esquema deberá representar las fuentes de abastecimiento, líneas de conducción, tanques y puntos de entrega a cada sector (figura 3.10). El esquema deberá de utilizar al máximo la infraestructura existente.

A partir del modelo de simulación creado, se identificarán los cambios necesarios para representar el esquema de entrega de agua en bloque. Los cambios incluyen cortes de derivaciones en ruta, modificación de cruceros y la instalación de líneas de conducción nuevas. Cada cambio deberá ser etiquetado para la posterior generación de volumen de obra (figura 3.11).

Figura 3.10 Ejemplo de esquema de entrega de agua en bloque

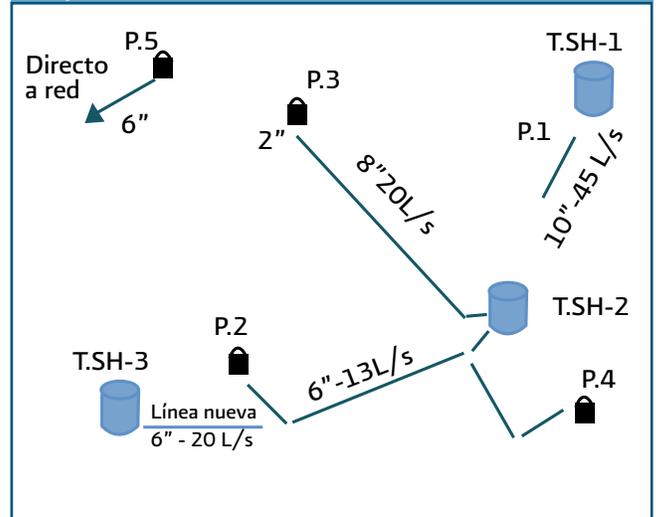
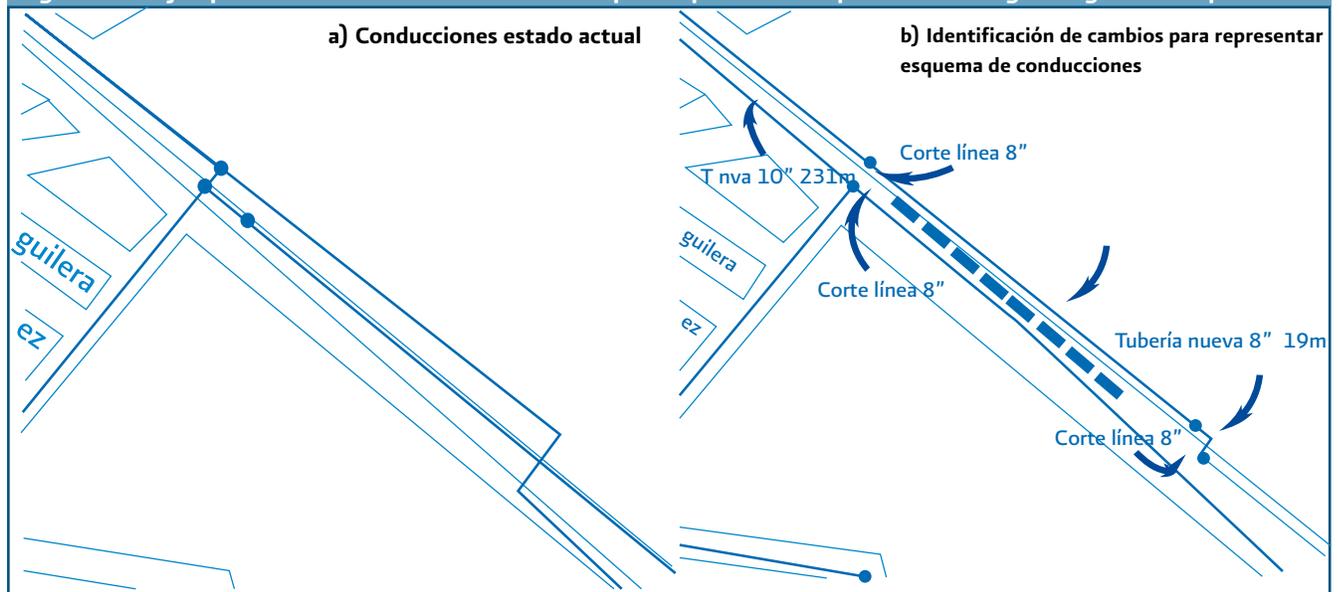


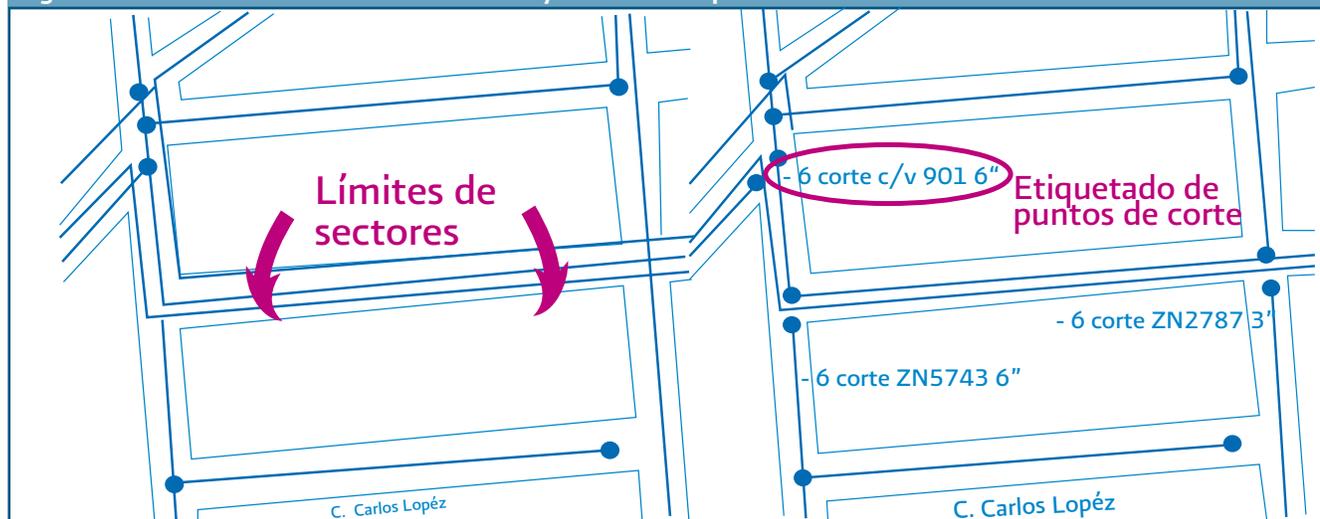
Figura 3.11 Ejemplo de aislamiento de conducciones para representar esquema de entrega de agua en bloque



b) Delimitación y aislamiento de sectores

Se deben identificar los cambios necesarios para que cada sector funcione de acuerdo a la redistribución de caudales propuesta en la sección 3.2.1.2 del presente Manual. Utilizando las herramientas del software de modelación, se deben de identificar los límites de cada sector para definir los puntos en que se realizarán los cortes como se muestra en la figura 3.12.

Figura 3.12 Identificación de límites de sector y definición de puntos de corte



Para verificar el aislamiento del sector, se cerrarán o apagarán las fuentes de suministro de agua al mismo y se ejecutará el cálculo del modelo. El resultado esperado

es que los nodos del sector en prueba no reciban gasto (figura 3.13).

Figura 3.13 Comprobación de aislamiento de sector



Una vez verificado el aislamiento de cada sector, se procede a la optimización del funcionamiento hidráulico de la red. Los criterios para optimizar la red de distribución se presentan en la sección siguiente.

3.2.3.3 Optimización del funcionamiento hidráulico de la red de distribución

A partir del punto de suministro de agua al sector, la red de distribución debe de ser capaz de entregar el gasto de-

mandado en cada nodo con presiones mayores a 1.0 kg/cm^2 y menores a 5.0 kg/cm^2 , tanto en las condiciones de máxima demanda, como en las condiciones de operación media y mínima. A continuación se dan algunas recomendaciones para controlar presiones mínimas y máximas.

a) Control de presiones bajas

- Sistemas por gravedad con cotas menores al tanque de regulación.- Cuando existen zonas con presiones menores a 1 kg/cm^2 en este tipo de sistema,

se utilizarán las herramientas del software de modelación para identificar las tuberías que abastecen dicha zona y que tienen una pérdida unitaria elevada debido a altas velocidades. Aquellas tuberías con velocidades mayores a 1.5 m/s tendrán pérdidas unitarias importantes.

Para mejorar las presiones, se apoyará el suministro a la zona con baja presión mediante la instalación de tuberías nuevas, cambio de diámetro en tuberías con velocidades altas, o conexiones de cruces desconectados. Todos ellos buscando generar la menor cantidad de obra posible. Este tipo de mejoras aplican para éste, y todos los tipos de sistemas que se presentan a continuación.

- Sistemas por gravedad con cotas mayores al tanque de regulación.- Cuando existen zonas con cotas mayores al desplante del tanque de regulación, se requerirá de rebombes instalados en el mismo tanque de regulación para zonas cercanas al mismo, y rebombes en línea tipo booster para zonas lejanas a éste. Las presiones en estas zonas serán reguladas mediante el diseño de una carga apropiada de trabajo del equipo, o mediante el uso de variadores de velocidad para mantener una carga constante.
- Sistemas con bombeo directo.- Las presiones en estas zonas serán reguladas mediante el diseño de una carga apropiada de trabajo del equipo, o mediante el uso de variadores de velocidad para mantener una carga constante. Habrá que tener cuidado de no generar zonas de alta presión al aumentar la carga de trabajo de un equipo de bombeo para abastecer otra zona con presiones bajas.

b) Control de presiones altas

En sectores con diferenciales de cotas mayores a 50 metros será necesario el control de presiones en zonas que excedan el máximo recomendado. Para el control de altas presiones se recomienda el uso de válvulas reductoras de presión automáticas, las cuales se ubicarán en un punto óptimo donde tengan mayor área de influencia y genere la menor obra posible. El funcionamiento de estas válvulas deberá de ser propuesto y validado con el modelo de simulación.

Todos los cambios realizados para la optimización de la red deberán de ser etiquetados e identificados en el modelo de simulación hidráulica y en los planos.

3.2.4 Análisis hidráulico de las conducciones para entrega de agua en bloque

Las conducciones deberán de ser evaluadas por flujo permanente o periodo extendido para asegurar que los sistemas puedan cumplir las condiciones requeridas por el esquema de entrega de agua en bloque.

En cada sistema de conducción se debe tener cuidado de representar lo más apegado a la realidad los siguientes datos, ya que su variación genera diferencias considerables en los resultados:

- a) Curva de gasto-carga de cada equipo de bombeo.
- b) Cota de desplante del equipo de bombeo.
- c) Nivel dinámico de succión de la bomba.
- d) Cota de la descarga a tanques.
- e) Diámetro y longitud de las tuberías.
- f) Ubicación y condiciones de demanda de inyecciones directa a la red (si existen).

Para agilizar la obtención de resultados y permitir la prueba de diferentes escenarios completos, las conducciones serán analizadas utilizando el modelo de simulación hidráulica integrado con la red de distribución.

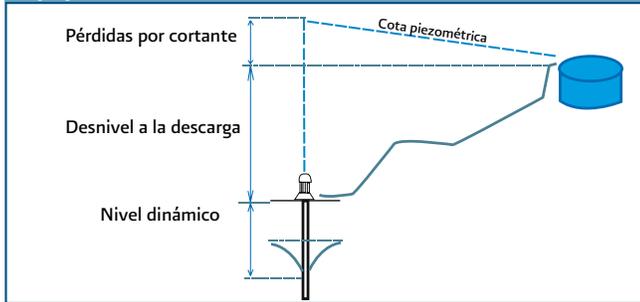
3.2.4.1 Análisis hidráulico en flujo permanente de las conducciones

El análisis hidráulico en flujo permanente consiste en definir de manera conjunta los puntos que se describen a continuación.

a) Diseño de equipos de bombeo

El gasto de extracción se define por la capacidad del pozo o por la demanda, en caso de rebombes. La carga de trabajo se conforma por la diferencia entre el nivel dinámico de la fuente, el nivel de la descarga en el tanque y las pérdidas generadas por la conducción y piezas especiales (figura 3.14). Con el uso del modelo de simulación se puede optimizar las condiciones de diseño mediante la realización de varias pruebas.

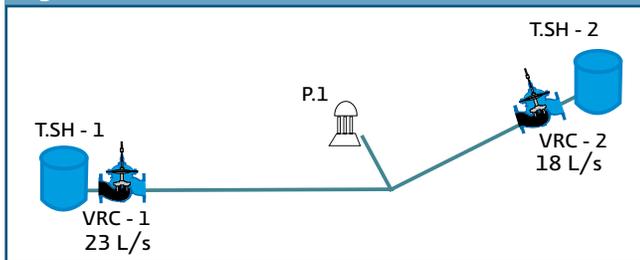
Figura 3.14 Definición de la carga de diseño para equipos de bombeo



b) Uso de válvulas de control automático

Cuando dentro del esquema de entrega de agua en bloque existe algún equipo de bombeo que entregue a dos o más tanques, es necesario el uso de válvulas reguladoras de caudal (figura 3.15).

Figura 3.15 Uso de válvulas automáticas para la regulación de caudal



Las válvulas reguladoras deberán ubicarse en las entradas de los tanques para facilitar su operación, mantenimiento y seguridad. El gasto de trabajo de cada válvula deberá de corresponder al diseño del esquema de entrega de agua en bloque.

c) Control de velocidades y presiones

Si la velocidad en las tuberías es mayor a 2.5 m/s, se evalúa el aumento del diámetro de la conducción.

Las presiones a lo largo de la conducción no deberán exceder el límite máximo de resistencia, el cual dependerá del material de la tubería y de los accesorios instalados a lo largo de la conducción. En caso de ser mayores, deberá considerarse la instalación de un rebombeo intermedio.

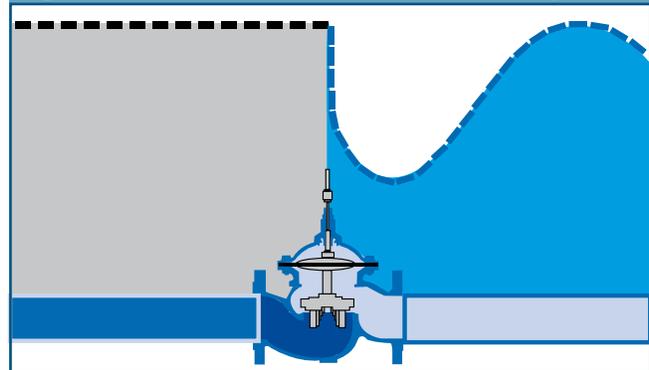
3.2.4.2 Análisis hidráulico de las conducciones en periodos extendidos

Cuando existe un sistema de conducción desde un equi-

po de bombeo hasta un tanque, el cual entrega en algún punto específico a la red, se puede realizar un análisis en periodo extendido.

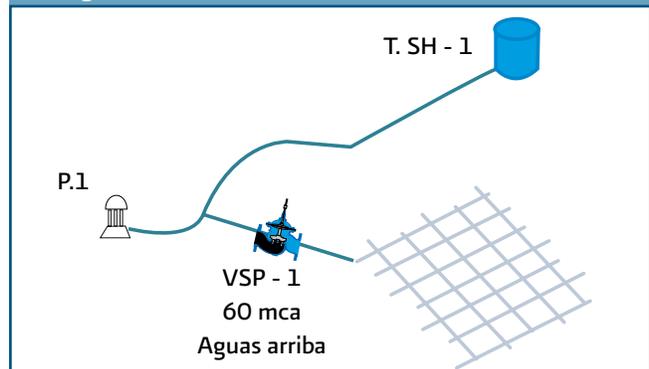
Para el correcto funcionamiento de la conducción es necesaria la instalación de una válvula sostenedora de presión, la cual será calibrada para mantener la presión aguas arriba para permitir que el sistema siga teniendo la capacidad de entregar hasta el tanque (figura 3.16).

Figura 3.16 Función de válvula sostenedora de presión



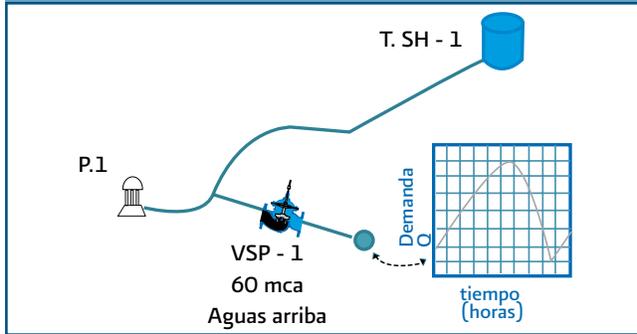
Este tipo de sistemas puede analizarse junto con la red de distribución en la sección 3.2.3.3, para tomar en cuenta las características de demanda de la zona a la que se inyecta de manera directa (figura 3.17).

Figura 3.17 Análisis del sistema de conducción con entrega directa a red en ruta



El sistema puede analizarse también de manera aislada, colocando un nodo de consumo aguas abajo de la válvula sostenedora de presión, el cual represente el gasto demandado por toda la zona, así como la variación de la demanda horaria (3.18).

Figura 3.18 Análisis de sistema con representación de la zona de influencia como un nodo de consumo



El análisis en periodos extendidos de los sistemas de conducciones ofrece algunas ventajas, como las que se presentan a continuación.

Cuando se analiza el sistema de conducción entregando a un tanque de regulación, el cual descarga a una red de distribución bien delimitada, el análisis en periodo extendido en los modelos de simulación permite evaluar el comportamiento del nivel de agua en el tanque de regulación. De esta manera se puede establecer el nivel óptimo inicial del tanque para que en condiciones de operación normales, no llegue a vaciarse o a desbordarse.

El análisis en periodo extendido en algunos programas de cómputo de simulación hidráulica permite establecer leyes de control para operar válvulas o equipos de bombeo de manera que se representen distintas condiciones de operación durante el día, como puede ser el paro de equipos de bombeo, o la apertura y cierre de válvulas para entregar a distintos tanques a lo largo del día.

3.2.5 Estrategias para la puesta en marcha del proyecto de sectorización

La implementación y puesta en marcha de un proyecto de sectorización requiere procedimientos técnicos y logística de actividades que implican un alto nivel de ingeniería aplicada. Por esta razón, en las secciones siguientes del Manual se desarrollan algunas estrategias generales para la puesta en marcha de la sectorización.

3.2.5.1 Programa de construcción, instrumentación y saturación de sectores

En primer lugar, se deberán recopilar, catalogar y cotizar todos los trabajos requeridos para la completa imple-

mentación del proyecto de eficiencia hidráulica. Estas categorías y el orden para su ejecución son:

- 1) Construcción de sectores hidráulicos.
- 2) Modificaciones en la red para el aislamiento y funcionamiento de sectores y conducciones.
- 3) Prueba de cierre.
- 4) Instrumentación de sectores hidráulicos.
- 5) Suministro e instalación de válvulas de control automático.
- 6) Suministro e instalación de equipos de bombeo.
- 7) Suministro e instalación de equipos de mejora energética.
- 8) Saturación y puesta en marcha de sectores.
- 9) Aislamiento definitivo de sectores.
- 10) Saturación de sectores y subsectores.
- 11) Implementación de programas de reducción de fugas.

Para cada una de las categorías deberá definirse su costo total, tiempo de entrega (en los conceptos que aplique) y tiempo de instalación o construcción. Se deberá tomar en cuenta también los tiempos de licitación y adjudicación de obra en aquellos conceptos que apliquen estas características.

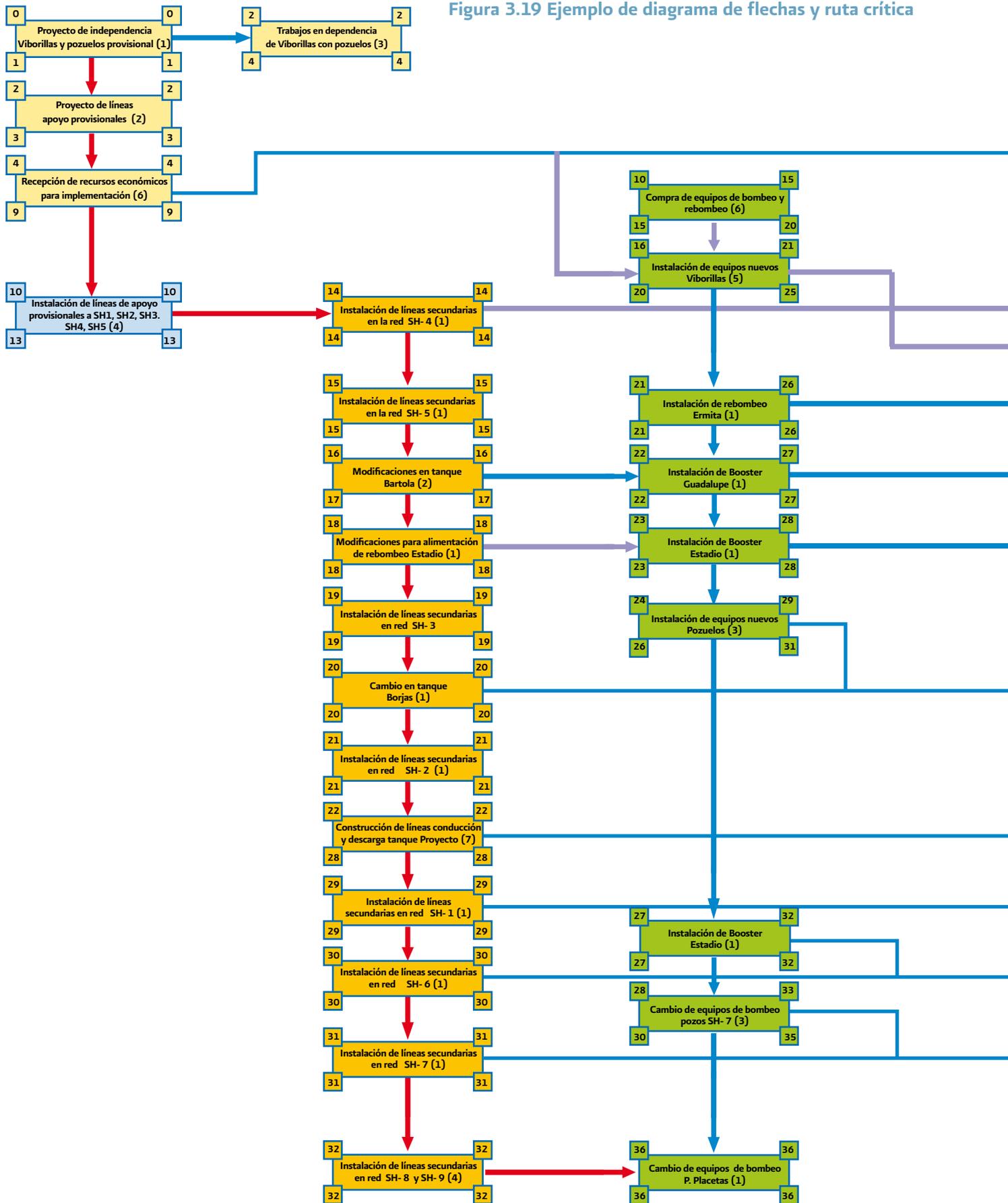
El principal factor que determina la programación e implementación del proyecto es la capacidad del organismo operador para disponer de recursos económicos. Esta capacidad definirá si la implementación se realizará de manera lineal, sector por sector, o de manera paralela, implementando varios sectores a la vez.

La elección del orden en que cada sector se implementará, depende de diferentes variables que el organismo operador debe valorar y jerarquizar. Las variables principales son:

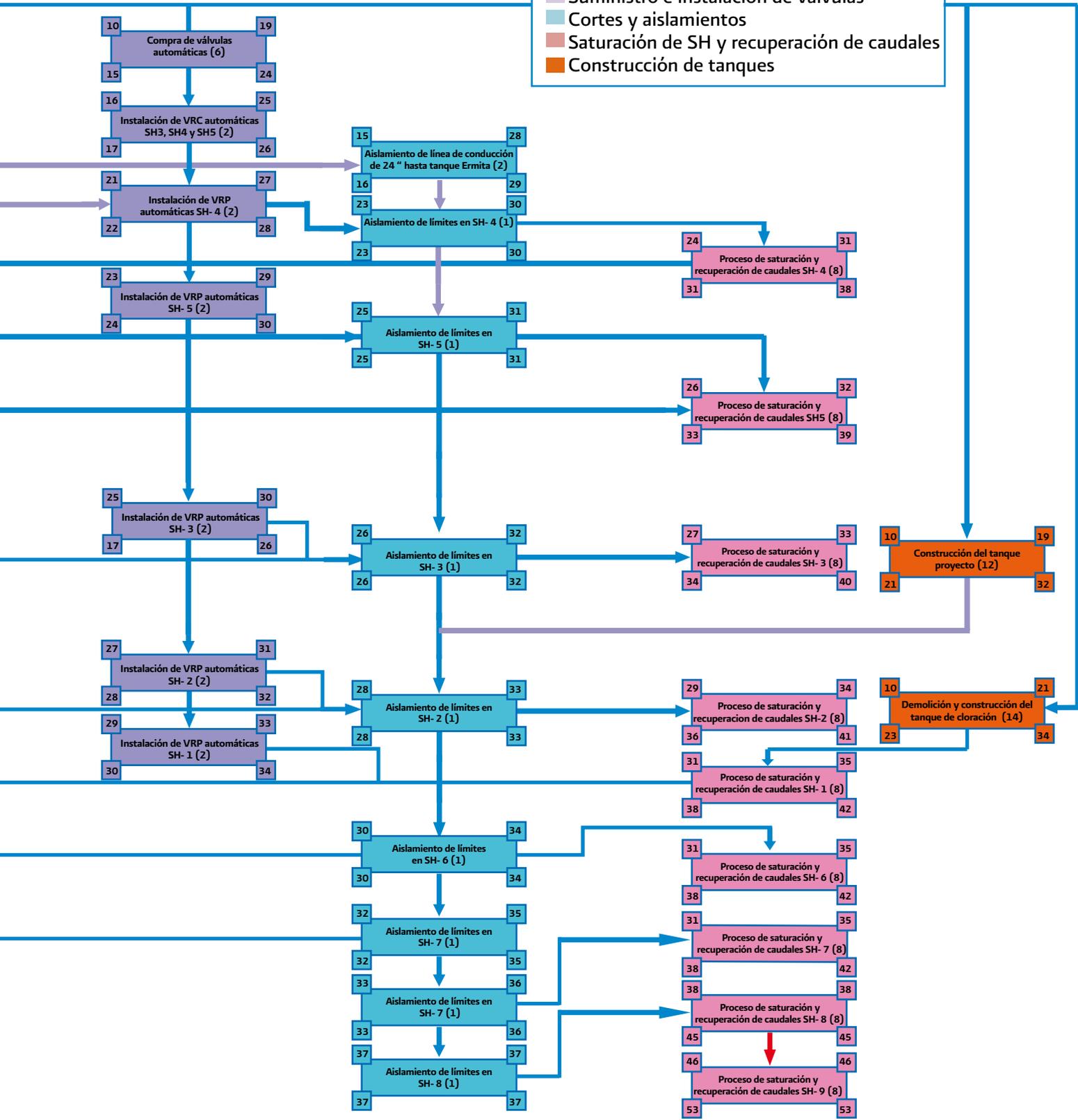
- a) Inversión requerida para la puesta en marcha de cada sector.
- b) Porcentaje de población beneficiada por la puesta en marcha.
- c) Potencial de ahorro energético obtenido por la puesta en marcha.
- d) Tiempo requerido para la implementación y puesta en marcha.

Una vez definido el orden de implementación de sectores, se elabora el diagrama de flechas y se asignan tiempos y recursos a cada actividad, con base en las características de cada categoría definida anteriormente. Así se obtiene la ruta crítica de la implementación del proyecto (figura 3.19).

Figura 3.19 Ejemplo de diagrama de flechas y ruta crítica



- Preliminares
- Líneas de apoyo
- Líneas de conducción y conexiones
- Suministro e instalación de equipos
- Suministro e instalación de válvulas
- Cortes y aislamientos
- Saturación de SH y recuperación de caudales
- Construcción de tanques



En el diagrama de flechas se establece el orden y secuencia en que las actividades deberán de realizarse, así como las fechas de inicio y término. El diagrama de flechas deberá de tomarse como guía para la implementación y deberá de actualizarse y modificarse de acuerdo a los resultados e imprevistos que se presenten.

A partir del diagrama de flechas se deberá realizar un calendario de actividades, en el cual se deberá identificar los periodos en los que zonas específicas de la red podrían quedarse sin servicio debido a las pruebas de aislamiento. Con esta información se programarán avisos oportunos a los usuarios para que puedan tomar previsiones.

3.2.5.2 Construcción de sectores hidráulicos

En esta etapa de la implementación se incluyen todos los trabajos relacionados con el aislamiento y conformación de sectores hidráulicos, y del esquema de entrega de agua en bloque.

En particular se incluyen los trabajos de:

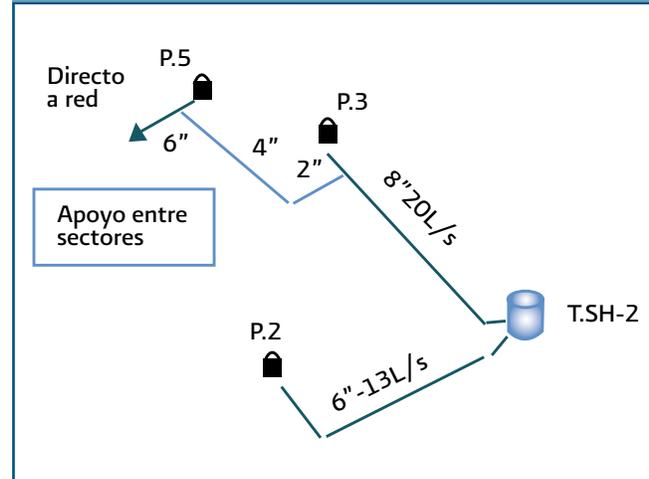
Cortes y modificaciones de cruceros para el aislamiento de sectores.- En este concepto se incluyen todos los trabajos relacionados con el establecimiento físico de los límites de sectores. Se recomienda realizar cortes definitivos en la red (figura 3.20) para los trabajos de aislamiento, ya que se ha observado que la instalación y cierre de válvulas para el aislamiento definitivo de sectores puede ocasionar que se pierda el control del aislamiento, derivando en su mal funcionamiento.

Figura 3.20 Trabajos de aislamiento de sectores



Las preparaciones para el apoyo entre sectores para resolver eventualidades deberán proyectarse en el esquema de entrega de agua en bloque (sección 3.2.4 del Manual). Deberá evitarse en medida de lo posible que se hagan conexiones entre las redes de distribución de los sectores (figura 3.21).

Figura 3.21 El apoyo entre sectores deberá planearse en el esquema de entrega de agua en bloque



Cortes y modificaciones de líneas para el aislamiento de conducciones.- Cuando un sistema de conducción funciona directo entre la fuente y un tanque es necesario eliminar todas las tomas y derivaciones en ruta que existan en la conducción, ya que éstas generan una pérdida importante de carga que podría disminuir o incluso impedir que el tanque reciba el gasto proyectado.

Los trabajos relacionados con este concepto se deben realizar antes de la instalación de nuevos equipos de bombeo, ya que debido a las tomas en ruta, el equipo podría trabajar fuera de su rango de funcionamiento eficiente y no cumplir con el gasto requerido.

Instalación de tubería nueva para el correcto funcionamiento de sectores.- Los trabajos relacionados con este concepto tienden a ser más numerosos y laboriosos que los anteriores. Por esta razón, se recomienda manejarlos como una partida independiente a los cortes y aislamientos con su propio frente de trabajo.

Dentro del catálogo de este concepto se deben identificar aquellas tuberías que son indispensables para cubrir zonas que pueden quedar sin alimentación debido a los trabajos de aislamiento. La instalación de estas tuberías deberá realizarse anterior a los cortes definitivos.

Construcción y rehabilitación de infraestructura (tanques, rebombes, cajas de válvulas).- En este concepto se incluyen los trabajos de obra civil y fontanería general para el uso de infraestructura nueva o existente, como pueden ser tanques reguladores, cajas rompedoras de presión, rebombes y cajas para la instalación de válvulas de control automático.

Debido a la larga duración de la obra civil, el inicio y fin de estos trabajos deberán programarse con suficiente holgura para evitar que retrasen la instalación de equipos electromecánicos, válvulas, o incluso la puesta en marcha del sector.

3.2.5.3 Instrumentación de sectores hidráulicos

La instalación de los equipos de bombeo, válvulas automáticas y equipo de mejora energética debe ser programada para realizarse cuando los trabajos de obra civil y fontanería de la construcción de sectores se encuentren terminados. Para este efecto es necesario tomar en cuenta los tiempos de entrega de cada uno de los equipos para evitar el retraso de la puesta en marcha de los sectores.

Para las válvulas de control automático que se instalen sobre calles o avenidas de manera subterránea o en predios que no pertenezcan al organismo operador, deberá construirse una caja de válvulas con espacio suficiente que permita su mantenimiento, operación y toma de datos para su calibración. Para permitir el mantenimiento de las válvulas, se recomienda el uso de bypass para permitir el acceso de flujo a la zona en caso de eventualidades o mantenimiento.

Sección 4 Eficiencia energética

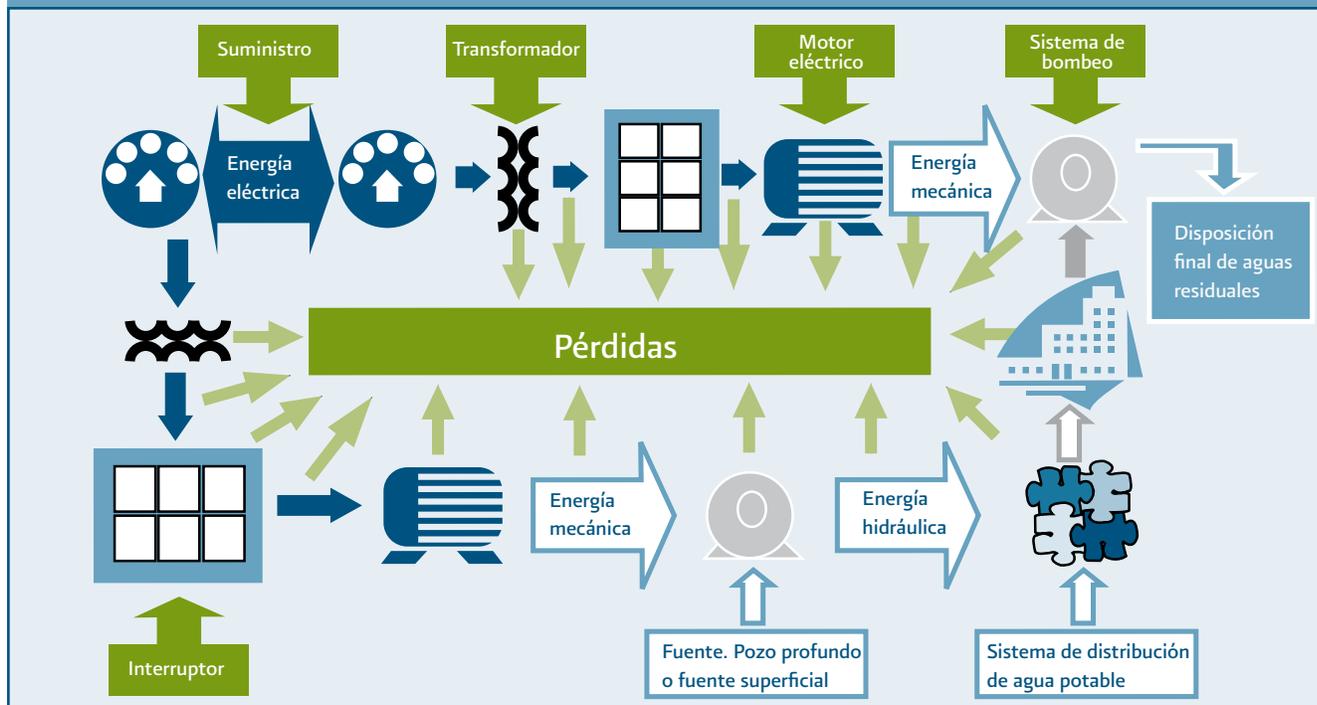
4.1 Diagnóstico de eficiencia energética

El Diagnóstico de Eficiencia Energética (DEE) es la aplicación de un conjunto de técnicas para determinar el grado de eficiencia con la que es utilizada la energía en un sistema de agua potable, además de especificar cuánta de esa energía es desperdiciada.

La parte concluyente del DEE es la identificación y cuantificación de medidas de bajo costo o con inversiones rentables para el ahorro de energía en las instalaciones de bombeo del sistema de agua potable, incluyendo todos los elementos consumidores de energía y sus respectivas pérdidas en la transformación energética.

Los principales elementos para el suministro y transformación energética, necesarios para la producción, suministro y tratamiento de agua, se muestran esquemáticamente en la figura 4.1, en la cual podemos ver la cadena de equipos desde el medidor de consumo del suministrador de energía, pasando por el transformador, el centro de control del motor y sus elementos correspondientes, el motor eléctrico, la bomba y la disposición final del agua potable y residual.

Figura 4.1 Esquema de un sistema típico de suministro y consumo energético en sistemas de agua potable y saneamiento



4.1.1 Metodología para elaborar un DEE

Para ejecutar un DEE se sugiere seguir una secuencia ordenada que lleve a mejores resultados. Dicha secuencia requiere realizar por un lado, trabajos de campo como

los descritos en la sección uno del presente Manual, y por otro, actividades de gabinete como las indicadas en esta sección. En la figura 4.2 se muestra un diagrama que indica a manera de resumen las actividades a realizar, así como la secuencia de ejecución.

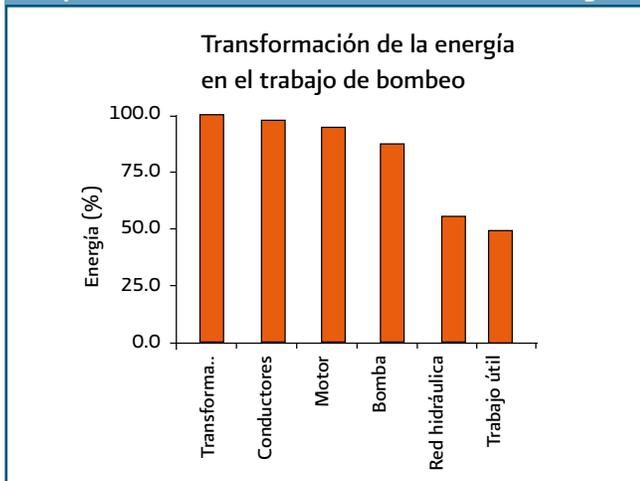
Figura 4.2 Metodología para realizar un DEE en sistemas de agua potable y saneamiento



4.1.1.1 Pérdidas energéticas en sistemas de agua

Dentro de las instalaciones del sistema de agua potable, la distribución típica de pérdidas de energía se muestra en la figura 4.2.

Figura 4.3 Pérdidas energéticas típicas en los componentes electromecánicos de un sistema de agua



Se observa que las mayores pérdidas de energía se presentan durante la transformación de energía mecánica en hidráulica (bomba a red hidráulica), que en algunos casos alcanza valores de entre 40 y 45%. Aunque, una vez recibida la energía en el motor eléctrico, no es extraño encontrar sistemas de bombeo con pérdidas de hasta el 60%.

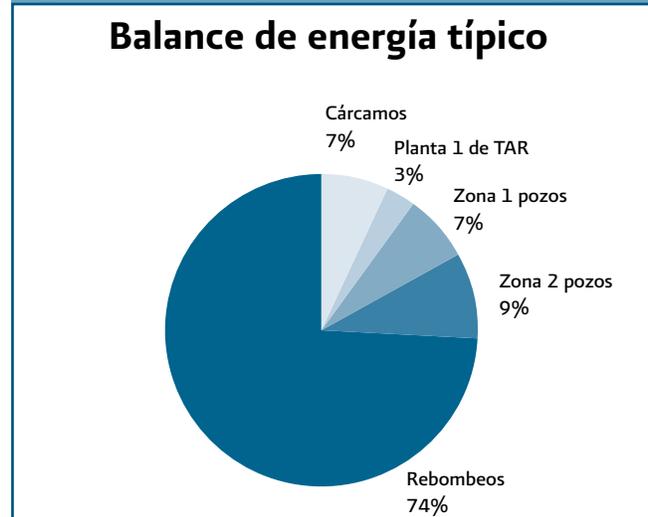
En ese rango de 40 – 45% precisamente se encuentran las oportunidades que se exploran más adelante como producto de la optimización de la operación hidráulica donde también se tienen oportunidades de ahorro de energía importantes.

4.1.1.2 Balance de energía

Al inicio del DEE, se recomienda analizar la distribución del consumo de energía a lo largo del sistema en evaluación. A esto se le conoce como análisis del balance de energía.

Con el balance de energía se identifican las instalaciones donde están los mayores consumos energéticos, el resultado de esta evaluación servirá de base para la planeación del DEE. En la figura 4.4, se muestra un balance típico en un sistema de agua potable y saneamiento.

Fig. 4.4 Descripción gráfica del balance de energía



4.1.1.3 Aspectos a evaluar en un DEE

Basado en la distribución de pérdidas descrita anteriormente, el DEE en un sistema de agua potable debe incluir el análisis de los sistemas típicos donde se consume la energía, que en orden de importancia son:

- Conjunto Motor – Bomba, incluyendo eficiencias, condiciones de operación y aspectos de mantenimiento.
- Sistema de distribución, incluyendo conducciones, tanques de regulación y otros accesorios.
- Sistema electromotriz incluyendo el transformador.
- Suministro energético, incluyendo las características del contrato de suministro.

Es importante hacer notar que, aunque existen muchas perspectivas para analizar los sistemas eléctricos, para los fines del DEE, se debe enfatizar el análisis de los aspectos que mayormente incidan en el consumo energético.

4.1.2 Diagnóstico energético de motores eléctricos

Del universo de motores eléctricos, es sin duda, el motor de inducción el más popular de todos, debido a su gran versatilidad y bajo costo. Es por lo tanto el de mayor aplicación en los sistemas de agua.

El primer paso para el diagnóstico energético del motor consiste en investigar las características generales del equipo a través de la recopilación de la información de la tabla 4.1:

Tabla 4.1 Datos a recopilar de un motor eléctrico para el diagnóstico de eficiencia

1) Datos nominales, también conocidos como "datos de placa" del motor	2) Operación	3) Historial
a) Marca y Tipo de motor b) Potencia (CP- _{nominal}) c) Voltaje de Alimentación (Volts) d) Corriente a plena carga (Amperes), Factor de servicio e) Velocidad de rotación a plena carga (RPM), f) Eficiencia nominal	a) Horas de operación del motor (h/ día y anuales) b) Horas de operación en horario punta, base e intermedia	a) Antigüedad b) Número de rebobinados y características

Las principales recomendaciones para conseguir información confiable son las siguientes:

- Verificación en campo.**- Aunque una fuente inicial de esta información son los archivos existentes en las áreas de mantenimiento del organismo, es muy común que no se cuente con ello. Aún teniéndolo, puede ser que no coincida con los reales debido a los continuos cambios físicos de equipos. Por ende, es importante verificar con el levantamiento físico de campo, los datos existentes en el momento de la evaluación para obtener conclusiones adecuadas.
- Revisión de bitácoras de operación.**- Normalmente las llevan los operadores de los equipos.
- Revisión de estadísticas.**- Aquellas con la que cuente el organismo operador.
- "Cruce" de información.**- Por ejemplo, con la estadística de facturación eléctrica se verifican las horas efectivamente trabajadas de los equipos.
- Investigación con los operadores y el personal de mantenimiento.**- Analizar los datos que normalmente no se registran por falta de bitácoras de mantenimiento como la última reparación de los equipos, la antigüedad, etc.

4.1.2.1 Evaluación de eficiencia de motores

La eficiencia de un motor eléctrico es la medida de su habilidad para convertir la potencia eléctrica que toma de la línea, en potencia mecánica útil. Se expresa usualmente en por ciento de la relación de potencia mecánica entre la potencia eléctrica.

$$\text{Eficiencia motor} = \frac{\text{Potencia mecánica}}{\text{Potencia eléctrica}} \times 100 \quad (4.1)$$

Para evaluar la eficiencia del motor existen varios métodos. En el caso de motores nuevos cuya eficiencia se mide en laboratorio, se utiliza el método indicado por la norma IEEE-112. Para los equipos en operación se tienen dos métodos prácticos que son los siguientes:

- Método del deslizamiento.**- Consiste en comparar la velocidad de rotación real con la de diseño, lo cual es bastante complicado de realizar y requiere del paro del equipo. Además, no aplica para motores rebobinados o que no están operando al voltaje de diseño.
- Método de la eficiencia ajustada o de la curva de eficiencia.**- Este es un procedimiento iterativo basado en la comparación de la eficiencia calculada contra la reportada por las curvas características de eficiencia y en función del factor de carga para el motor en estudio. Este procedimiento resulta más viable de aplicar y proporciona resultados aceptables para fines de diagnóstico energético. Este método implica la medición de los siguientes parámetros eléctricos:
 - Tensión eléctrica de entrada (Voltaje) entre fases: V_{AB}, V_{BC}, V_{CA} (Volt) y valor trifásico (V)
 - Corriente por fase: I_A, I_B, I_C , y valor promedio trifásico: I_T (Amperes)
 - Potencia activa por fase: P_A, P_B, P_C , y valor trifásico: P_T (kW)
 - Potencia reactiva por fase: P_{RA}, P_{RB}, P_{RC} , y valor trifásico: P_{RT} (kVAR)
 - Factor de potencia por fase: FP_A, FP_B, FP_C , y valor trifásico: FP (%)

Para las mediciones anteriores deben seguirse los procedimientos y recomendaciones indicados en la sección 1.1.2.10 de este Manual.

Los pasos a seguir para el cálculo de eficiencia del motor con el método de eficiencia ajustada son los siguientes:

Paso 1. A partir de las características nominales del motor (CP_{nominal} , RPM, I, V, etc.), especificadas en la tabla 4.1, se deberá indentificar la curva de eficiencia del motor; como ejemplo en la Figura E1 del Anexo E, se presenta una gráfica con curvas para diferentes capacidades nominales de motores con 1800 rpm.

Paso 2. A partir de la potencia eléctrica demandada por el motor (medición efectuada), se calcula el factor de carga nominal mediante la ecuación 4.2.

$$FC = \frac{\frac{P_e}{\eta_m}}{CP_{\text{nominal}} * 0.746} \quad (4.2)$$

Donde:

FC = Factor de carga de operación del motor (adimensional)

P_e = Potencia eléctrica demandada por el motor (Dato obtenido en mediciones de campo) (kW)

η_m = Eficiencia de operación del motor (%)

CP_{nominal} = Potencia nominal del motor (la real verificada en campo) (H.P.)

Paso 3. Comprobar en la curva del motor, que la eficiencia utilizada en el Paso 1, corresponda al factor de carga calculado. En caso contrario, se repite el paso anterior, utilizando la eficiencia que corresponda al FC calculado hasta que ambos valores coincidan, poniendo fin al proceso iterativo. Los últimos valores de eficiencia del motor y factor de carga son los resultados reales del motor en estudio.

Paso 4. Una vez determinada la eficiencia del motor y factor de carga nominales, la eficiencia del motor se deprecia de acuerdo a los siguientes criterios:

- Si el motor tiene más de 10 años de antigüedad, depreciar un punto porcentual.
- Si el motor ha sido rebobinado, depreciar dos puntos porcentuales; cuando se conoce la temperatura a la que se expuso el motor durante el proceso de rebobinado, le eficiencia se deprecia de acuerdo a la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Depreciación de la eficiencia de un motor rebobinado en función de la temperatura utilizada

Temperatura (C°)	Puntos de reducción de la eficiencia
633	0.0053
683	0.0117
733 (soplete)	0.0250
Químico	0.0040

- Si el voltaje de alimentación es diferente al de placa, aplicar el ajuste a la eficiencia indicado en la curva mostrada en la figura incluida en la figura E2 del Anexo E.
- Si el voltaje de alimentación medido presenta un desbalance, aplicar el ajuste a la eficiencia indicado en la curva mostrada en la figura E3 del Anexo E.

4.1.2.2 Análisis de resultados de la eficiencia de motor

El análisis de resultados tiene como objetivo el detectar condiciones de operación ineficientes que estén ocasionando consumos de energía en exceso. En la tabla 4.3, se presenta una relación de las principales condiciones de operación ineficientes que suelen presentarse con los motores eléctricos, así como el diagnóstico del origen de dicha condición.

Tabla 4.3 Condiciones de operación ineficiente de los motores eléctricos

Condición observada	Diagnóstico
Voltaje de alimentación por debajo del nominal	El voltaje en el punto de acometida está por debajo del nominal
	El voltaje en el punto de acometida presenta variaciones mayores al 5%
	El voltaje en el punto de acometida es el nominal y no presenta variaciones significativas
Desbalance del voltaje de alimentación al motor	El voltaje en el punto de acometida está desbalanceado
	El voltaje en la acometida está balanceado y en el secundario del transformador desbalanceado
	El voltaje en los bornes del secundario del transformador está balanceado y en la alimentación al motor se encuentra desbalanceado
Desbalance en la corriente demandada por el motor	El desbalance en corriente es inversamente proporcional al desbalance en voltaje
	El desbalance es producido por una demanda desbalanceada por las fases del motor
La velocidad de operación del motor está por debajo de la velocidad a plena carga	Problemas con rodamientos y/o cojinetes
Alta temperatura y/o alta vibración en cojinetes y/o rodamientos	
El motor es de eficiencia estándar y tiene más de 10 años de operación	La eficiencia de operación del motor es baja
El motor ha sido reparado (rebobinado), más de dos veces	La eficiencia del motor se encuentra depreciada
El motor se encuentra trabajando con un factor de carga menor al 45%	El motor se encuentra trabajando en una zona donde su eficiencia de operación es baja
El motor se encuentra trabajando con un factor de carga mayor al 100%	El motor se encuentra trabajando en una zona donde su eficiencia de operación es baja

4.1.3 Diagnóstico de equipos de bombeo

Es importante diagnosticar aspectos que pueden ser causa de excesivo consumo energético derivados del funcionamiento del equipo de bombeo, pero que al mismo tiempo representan oportunidades para ahorrar energía de manera sustancial.

Los principales aspectos a diagnosticar son:

- Eficiencia actual del equipo de bombeo
- Condiciones de operación del sistema
- Características de las instalaciones y pérdidas energéticas en el sistema de conducción

4.1.3.1 Pérdidas típicas en bombas

Las bombas sufren pérdidas de energía como resultado de los mecanismos hidráulicos que suceden en el interior y exterior de sus componentes.

Para entender el origen de las pérdidas en la operación de bombeo, es importante repasar los diferentes tipos de pérdidas que se presentan:

a) Pérdidas Internas

- Pérdidas de Carga:** Resultan de la viscosidad y la turbulencia del agua. Ejemplo de éstas son las pérdidas por choques en la entrada del difusor.
- Pérdidas por Fugas:** Las pérdidas por fugas internas tienen como causa el juego que necesariamente ha de existir entre partes móviles como el impulsor y partes fijas, así como de los acoplamientos entre tazones; también según el diseño de los equipos de bombeo una parte del caudal que entra a la bomba se deriva antes de entrar al impulsor y con ello se pierde energía.
- Pérdidas por Rozamiento Interno:** El impulsor de la bomba tiene superficies inactivas desde el punto de vista de su función de comunicar energía al fluido, estas superficies están en contacto directamente con el fluido, asimismo cuando el fluido se le aplica energía cinética tiene fricciones con las partes fijas, lo cual da lugar a pérdidas por fricción.

b) Pérdidas Externas

- Fugas Externas:** Éstas se producen en los lugares donde el eje de los impulsores atraviesa la carcasa de la máquina.

- Pérdidas por Rozamiento Externo:**
- Rozamiento mecánico en las empaquetaduras** que existen en los ejes.
- Rozamiento mecánico en los cojinetes** de la bomba.

Para diagnosticar los equipos de bombeo, el primer paso consiste en investigar las características generales del equipo a través del recopilar la información siguiente:

a) Datos nominales o de diseño

- Marca
- Tipo de bomba
- Caudal (l/s)
- Carga hidráulica total (m)
- Tipo y tamaño de impulsor
- Número de etapas o pasos
- Materiales de construcción
- Curva de operación
- Eficiencia nominal
- Velocidad de operación (rpm)

b) Diagramas de operación

- Sistemas de pozo profundo
- Sistemas de rebombeo

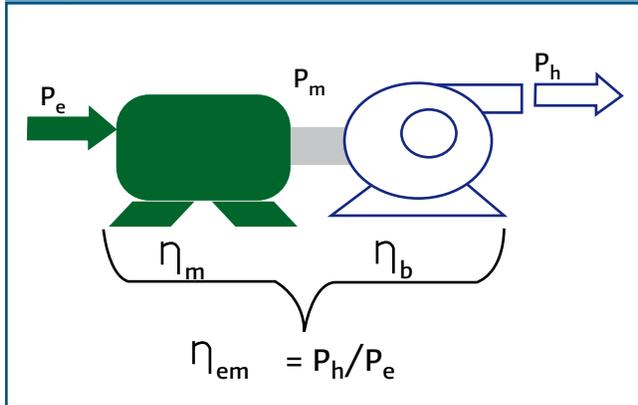
4.1.3.2 Evaluación de eficiencias de la bomba y electromecánica

La eficiencia de la bomba (η_b) se calcula como el cociente de la potencia hidráulica de salida (P_h) entre la potencia mecánica absorbida (P_m). La ecuación 4.3 muestra la manera de calcular la eficiencia de la bomba.

$$\eta_b = \frac{\text{Potencia hidráulica de salida } (P_h)}{\text{Potencia mecánica absorbida } (P_m)} \times 100 \quad (4.3)$$

Debido a la dificultad de medir la potencia mecánica por separado y de ahí medir la eficiencia de la bomba, se recomienda evaluar la eficiencia electromecánica del conjunto bomba-motor como se observa esquemáticamente en la figura 4.5.

Figura 4.5 Diagrama esquemático de las eficiencias que integran la eficiencia electromecánica



La eficiencia de la bomba y la eficiencia electromecánica se calculan de la forma siguiente:

Paso 1. Se calcula la potencia hidráulica de salida a través de la ecuación 4.4.

$$P_h = \frac{H_b * Q * \rho * g}{1000} \quad (4.4)$$

Donde:

- P_h = Potencia hidráulica de salida (kW)
- H_b = Carga hidráulica de bombeo (m.c.a.)
- Q = Caudal que pasa por la tubería, a la descarga de la bomba (m^3/s)
- ρ = Peso específico del agua (kg/m^3)
- g = Aceleración de la gravedad en (m/s^2)

El valor de caudal (Q) es un dato obtenido de las mediciones de campo, los valores ρ y g son datos casi constantes en el rango típico de temperaturas de operación y generalmente se toman los valores de 1000 y 9.81, respectivamente.

La carga total de bombeo es una combinación de las distintas cargas parciales que se calculan como se indica en el Anexo E Sección E.2.

Paso 2. Con el valor de la potencia hidráulica (P_h) calculada y la potencia eléctrica medida (P_e), se calcula la eficiencia electromecánica final con la ecuación 4.5.

$$\eta_{em} = \frac{P_h}{P_e} \quad (4.5)$$

Donde:

- η_{em} = Eficiencia electromecánica
- P_h = Potencia hidráulica de salida (kW)
- P_e = Potencia eléctrica medida (kW)

Paso 3. Para el cálculo de la eficiencia de la bomba se tiene: Una vez calculada la η_{em} , se sustituye en la ecuación de eficiencias (motor, bomba) y se determina despejando la eficiencia de la bomba b de la manera siguiente:

$$\eta_b = \frac{\eta_{em}}{\eta_m} \quad (4.6)$$

En el caso de la eficiencia del motor es más fácil determinarla según lo indicado en el apartado anterior (4.1.2) y así poder determinar la eficiencia de la bomba.

4.1.3.3 Análisis e interpretación de los valores de eficiencia electromecánica diagnosticada

Los valores determinados de la eficiencia electromecánica (η_{em}) deben compararse durante el DEE con al menos los valores recomendados por las NOM's de eficiencia energética aplicables a los motores y equipos de bombeo existentes en nuestro país, con el fin de determinar los niveles de ahorro de energía potenciales. Esto servirá como base para considerar la sustitución de equipos durante la integración de la cartera de proyectos de ahorro de energía.

Las NOM's mexicanas que aplican a los equipos electromecánicos más comunes en los sistemas de agua potable y saneamiento son las siguientes:

- 1) NOM-001-ENER: Eficiencia energética de bombas verticales tipo turbina con motor externo eléctrico vertical.
- 2) NOM-010-ENER: Eficiencia energética de bombas sumergibles.
- 3) NOM-006-ENER: Eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación.

Estas NOM's establecen valores mínimos recomendables para las eficiencias de equipos y sistemas como pozos profundos.

A manera de ejemplo, se muestra en la tabla 4.4, los valores mínimos recomendables para la eficiencia electromecánica de pozos profundos en operación que recomienda la NOM-006-ENER-1995, en función del intervalo de capacidades.

Tabla 4.4 Valores mínimos de eficiencia electromecánica con base en la NOM-006-ENER-1995

Intervalo de potencias		Eficiencia electromecánica (%)
kW	HP	
5.6 - 14.9	7.5-20	52
15.7 - 37.3	21-50	56
38.0 - 93.3	51-125	60
94.0 - 261	126-350	64

Esta Norma establece que en cualquier sistema de bombeo para pozo profundo que utilice la energía eléctrica como medio energético para su operación y que, derivado del diagnóstico presente una eficiencia electromecánica menor o igual a la indicada en la tabla 4.4, deberán efectuarse acciones de rehabilitación y/o sustitución de los equipos electromecánicos, con el propósito de elevar la eficiencia.

De acuerdo a lo que establece la Norma, las acciones de rehabilitación y/o sustitución pueden estar dirigidas al motor, bomba, a la estructura del pozo profundo, o a una combinación de éstos; de tal forma que se obtengan valores de eficiencia electromecánica mucho mayores a los establecidos en la Tabla 4.4.

Los ahorros potenciales que es factible lograr pueden estar arriba del 20% de los valores de eficiencia, que establece la NOM 006 para pozos en operación.

4.1.3.4 Análisis de las condiciones de operación de los equipos de bombeo

Es muy común encontrar que los equipos de bombeo operen en condiciones diferentes para las que están diseñados. Entre las causas que originan esta situación están las siguientes:

- a) Cambio de condiciones operativas (carga, gasto), debido a los cambios de zonas de abastecimiento

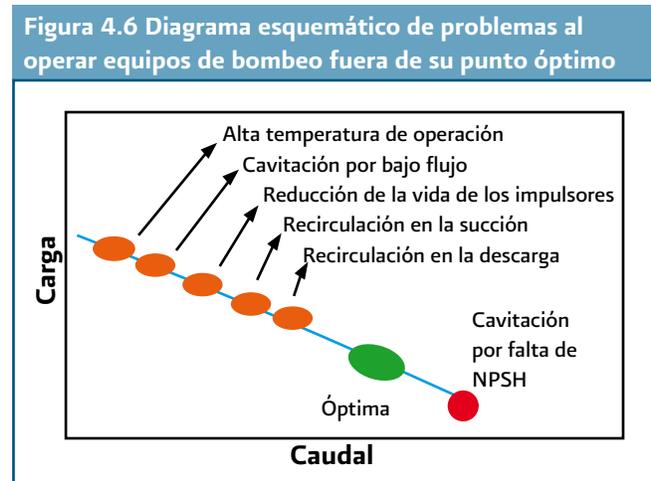
ocasionados por fluctuaciones en la red de distribución (tandeos, consumos en el día y la noche) cuando la descarga de estos equipos es directamente a la red de distribución.

- b) Reparaciones urgentes ocasionadas por la falta de mantenimiento preventivo. Es común atender reparaciones urgentes y carecer de componentes disponibles en inventario para realizar las reparaciones necesarias o la sustitución de los equipos con alguno diseñado para otras condiciones de operación (carga, gasto).

De acuerdo con su diseño, todos los equipos de bombeo tienen un punto de operación óptimo Carga – Gasto, donde todas las pérdidas descritas anteriormente se minimizan. Fuera de este punto se presentan problemas como los siguientes:

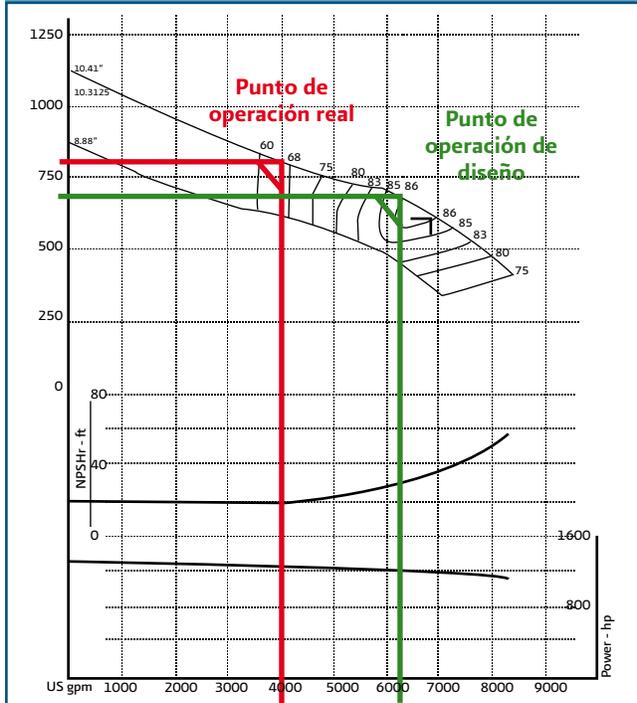
- a) Bajo rendimiento energético.
- b) Reducción del tiempo de vida de sus componentes, particularmente de los impulsores y anillos de desgaste.
- c) Cavitación por bajo flujo en la succión.

En la grafica mostrada en la figura 4.6, se presenta un esquema de los problemas típicos que se presentan al operar un equipo de bombeo fuera de la zona óptima de operación.



Como ejemplo, el efecto en la reducción de eficiencia en un equipo de bombeo se ilustra en la figura 4.7, donde se puede observar que una variación significativa en las condiciones de operación Carga–Gasto, pueden significar variaciones de hasta un 20% en la eficiencia del equipo.

Figura 4.7 Modificación de la eficiencia por variación de condiciones de operación en una bomba



Ante esta situación, es muy importante que durante el DEE se realicen las siguientes tareas:

- 1) Identificar claramente el esquema de operación del equipo en estudio. Esto incluye las condiciones de operación de Carga – Gasto para diferentes periodos del día o de la semana.
- 2) Obtener los parámetros de diseño, de ser posible la curva original de diseño del equipo que se encuentre instalado para poder emitir las recomendaciones pertinentes a cada situación (modificación de impulsores, sustitución de impulsores, cambio de equipo de bombeo, etc.). Los casos típicos de operación de equipos fuera de su diseño original se presentan en la tabla 4.5.

Tabla 4.5 Casos típicos de operación fuera de su diseño original

Tipo de bomba	Ubicación del punto de operación
Centrífuga vertical	Por encima de la curva de la bomba
	Por debajo de la curva de la bomba
Centrífuga horizontal	Por encima de la curva de la bomba
	Por debajo de la curva de la bomba

4.1.4 Capacidad de sistemas de conducción

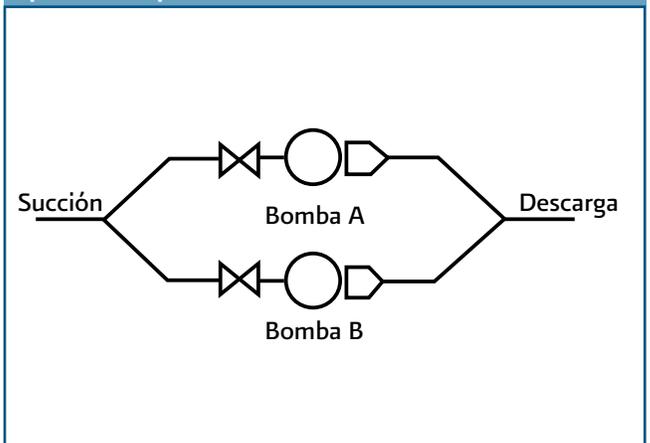
4.1.4.1 Problemas típicos en sistemas de conducción

Cuando lo que se busca es incrementar el gasto o la carga por la conducción, un problema común que afecta la operación de los sistemas de bombeo es la escasa capacidad de los sistemas de conducción (diámetro de la tubería).

Entre los principales problemas a analizar durante el DEE están los siguientes:

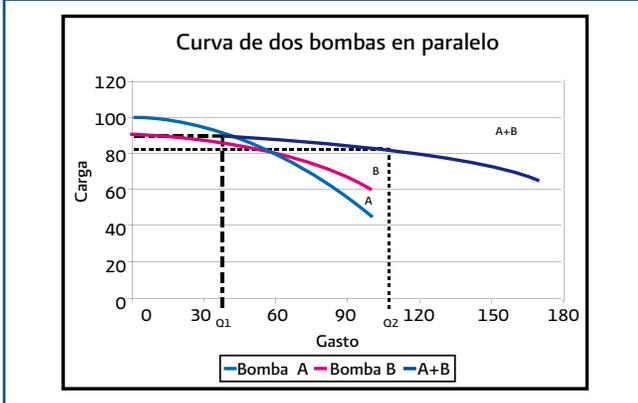
- a) **Excesivas pérdidas energéticas.-** Este problema se presenta en la descarga de los equipos de bombeo cuando se tienen accesorios con operación anormal (válvulas semiabiertas), o cuando se interconectan a las redes de distribución conexiones en contraflujo ó a 90 grados.
- b) **Reducción en la capacidad de conducción en los múltiples de descarga.-** Este problema se presenta frecuentemente en sistemas de rebombeo compuestos por equipos múltiples trabajando en paralelo, donde se ha aumentado el número de equipos pretendiendo entregar más caudal a la red sin revisar la capacidad de la conducción. Lo que ocasiona que los equipos trabajando en conjunto no suministren la suma de sus caudales individuales, debido al aumento en la carga (derivado por las pérdidas de carga en las tuberías) y se reduzca significativamente su eficiencia. Este problema se explica técnicamente por la teoría de los sistemas operando en paralelo, como se muestra en la figura 4.8.

Figura 4.8 Arreglo típico de bombas centrífugas operadas en paralelo



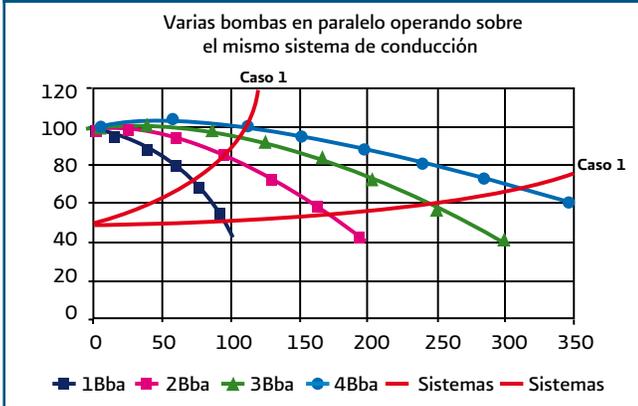
Normalmente la curva de operación del arreglo de equipos conectados en paralelo se obtiene sumando las capacidades de cada bomba para iguales condiciones de carga. El resultado de esto es mostrado en la figura 4.9.

Figura 4.9 Características de carga-capacidad de bombas centrífugas operadas en paralelo



Con frecuencia se piensa que al meter una bomba adicional se incrementará el gasto al doble y si se mete una tercera, al triple, y así sucesivamente. En la realidad esto no ocurre así, ya que al haber más gasto por el mismo sistema de conducción, la carga se incrementa y por ende las pérdidas por cortante en la tubería aumentan. Esta situación hace que la aportación de caudal de cada bomba individualmente se reduzca al ir aumentando la carga (pérdidas) tal como se mostró en la figura 4.8, donde se presenta el comportamiento del conjunto. El efecto del incremento en el caudal y comportamiento de la carga hidráulica en el sistema de conducción con varios equipos en paralelo, se muestra en la figura 4.10.

Figura 4.10 Efecto de la operación de varias bombas en paralelo con respecto al sistema de conducción



En el Caso 1, la curva del sistema es bastante plana para las cuatro bombas, por lo que conforme se operan más bombas el gasto se va incrementando.

En el Caso 2, la situación es diferente, ya que la curva del sistema no es tan plana como en el Caso 1 (debido al aumento de pérdidas hidráulicas en la conducción). Nótese que al entrar la cuarta bomba en operación, prácticamente ya no se incrementa el caudal total, sino que se reparte éste entre las cuatro bombas, pero la carga hidráulica se incrementa al doble con respecto al Caso 1.

4.1.4.2 Pérdidas de carga hidráulica en los sistemas de conducción

Es posible que en algunos sistemas de distribución, las pérdidas energéticas por cortante en las tuberías sean significativas. Para evaluar esta posibilidad, durante el DEE se recomienda aplicar el siguiente procedimiento:

Paso 1. Con los datos recopilados durante la campaña de medición e inspección de campo, se determina la velocidad del agua en las tuberías primarias de conducción a la descarga de las instalaciones de bombeo.

Paso 2. En las tuberías de conducción donde se tengan velocidades del agua por encima de los 2.0 m/s, se evalúan las pérdidas energéticas por cortante, para integrarlas posteriormente en la cartera de proyectos de eficiencia energética.

Para realizar esta evaluación de pérdidas de carga hidráulica en la conducción, se tienen las siguientes opciones:

- Realizar la evaluación con los métodos de análisis de conducciones basado en la modelación hidráulica, lo cual implica la necesidad de construir dicha herramienta antes de esta evaluación.
- Aplicar el procedimiento simplificado para una evaluación rápida del potencial de ahorro.

Esta última opción es recomendable en las primeras etapas del proyecto al determinar las "medidas de ahorro de rápida implementación", para no tener que esperar a contar con el modelo de simulación.

Para realizar el análisis por el método convencional, se emplea el siguiente procedimiento:

Paso 1. Calcular las pérdidas primarias por cortante en la tubería instalada.

Paso 2. Calcular las pérdidas por singularidades (accesorios).

Paso 3. Calcular la potencia eléctrica (P_e) necesaria para compensar las pérdidas de carga por cortante, utilizando la ecuación 4.7.

$$P_e = \frac{h_f * Q * 9.81}{\eta_{em}} \quad (4.7)$$

Donde:

- P_e = Potencia eléctrica necesaria para compensar pérdidas (kW)
 h_f = Pérdidas de carga hidráulica por cortante (m)
 Q = Caudal (l/s)
 η_{em} = Eficiencia electromecánica del conjunto motor-bomba

Este valor de potencia necesaria para la compensación de pérdidas depende de gran manera de los diámetros de la tubería al incrementar el gasto que se quiere explotar; asimismo, se deben de considerar las posibles cargas adicionales por incremento de longitudes y desniveles topográficos adicionales, lo cual es una base fundamental para el cálculo de esta medida de ahorro dentro del proyecto de eficiencia energética.

4.1.5 Análisis del suministro eléctrico

Las principales áreas de oportunidad de eficiencia energética, derivadas de mejorar los parámetros de facturación y las componentes del sistema previos al conjunto bomba – motor (que conocemos genéricamente como aspectos del suministro eléctrico), son:

- Análisis del factor de potencia
- Evaluación de conductores eléctricos
- Análisis de pérdidas en transformadores

4.1.5.1 Análisis del factor de potencia

La influencia que tiene un factor de potencia bajo sobre el valor de la corriente demandada en el sistema, ocasiona pérdidas de energía, entre las que destacan las siguientes:

- Aumento de las pérdidas por efecto Joule; estas pérdidas se manifestarán en:
 - Los conductores entre la acometida y el (los) motor (es).
 - Los embobinados de los transformadores de distribución.

- Los dispositivos de operación y protección.
- Aumento en la caída de voltaje en los cables alimentadores, que puede resultar en un voltaje de entrada a los motores menor y con ello en pérdidas de eficiencia en los mismos.
 - Incremento de la potencia aparente, con lo que se reduce la capacidad de carga instalada. Esto es importante en el caso de la capacidad en los transformadores de distribución.

Estas pérdidas afectan a la compañía suministradora de energía eléctrica; por esta razón se penaliza al usuario haciendo que pague más por su consumo de energía eléctrica cuando tienen un factor de potencia bajo.

El valor establecido como parteaguas del factor de potencia es del 0.9 (90%). Debajo de ese valor se paga una penalización en % del consumo realizado y se calcula por medio de la ecuación 4.8:

$$\% \text{ Recargos} = \frac{3}{5} \left[\left(\frac{90}{FP} \right) - 1 \right] * 100 \quad (4.8)$$

Donde FP es el factor de potencia existente en la instalación.

Por encima del 0.9 (90%), la bonificación se calcula de igual manera sobre el consumo realizado por medio de la ecuación 4.9.

$$\% \text{ Bonificación} = \frac{1}{4} \left[1 - \left(\frac{90}{FP} \right) \right] * 100 \quad (4.9)$$

La tarea durante el DEE respecto al análisis del factor de potencia FP, consistirá en medir el FP real de todos los equipos diagnosticados. En caso de que el instrumento de medición no registre directamente el valor de FP trifásico, se deberá calcular con base en los valores de potencia activa y potencia reactiva obtenidos durante las mediciones. En caso de que la instalación corresponda únicamente a la de un equipo motor-bomba, el valor de potencia activa y reactiva puede tomarse directamente del medidor de energía eléctrica (CFE) en caso de no contar con equipo de medición particular. La manera de poder determinar el factor de potencia se describe aplicando la ecuación 4.10.

$$FP = \frac{P_{act}}{\sqrt{(P_{act}^2 + P_r^2)}} \quad (4.10)$$

Donde:

- FP = Factor de potencia
 P_{act} = Potencia activa medida (kW)
 P_r = Potencia reactiva medida (kVar)

El factor de potencia en los motores de inducción depende de su capacidad (CP), y del factor de carga (FC) al cual esté trabajando el equipo. En la figura E.4 del Anexo E, se muestran los valores esperados del Factor de Potencia a plena carga, como función de la capacidad nominal del motor, y en la figura E.5 del mismo Anexo se muestra como varía el factor de potencia de un motor en función del factor de carga al cual se encuentre trabajando. De esta última figura se desprende que una de las causas del bajo factor de potencia, es originada por motores trabajando con un bajo factor de carga. A estos equipos se les considera como motores sobredimensionados).

Entonces, durante el DEE se determinará si el factor de potencia del motor está por debajo del que le correspondería (dado el número de polos, capacidad nominal y factor de carga al cual está trabajando. De ser así esto será un indicativo de que el motor se encuentra en mal estado, por tanto, dependiendo del análisis operativo y estado físico del motor, se le podría aplicar mantenimiento al motor, o la sustitución del mismo por uno nuevo de la capacidad adecuada y de preferencia de alta eficiencia.

4.1.5.2 Evaluación de conductores eléctricos

En los conductores eléctricos se presentan pérdidas de energía eléctrica por el efecto Joule, las cuales son función de la resistencia del conductor y el cuadrado de la corriente eléctrica que circula por él. Matemáticamente las pérdidas de energía en los conductores se expresan mediante la ecuación 4.11.

$$h_j = R_c * I_c^2 \quad (4.11)$$

Donde:

- h_j = Pérdidas por efecto Joule (Watts)
 R_c = Resistencia del conductor (Ohms)
 I_c = Corriente circulando en el conductor (Amperes)

Al paso de la corriente por el conductor, la resistencia genera una caída de voltaje (ΔV_j) y dependiendo de la longitud del conductor, a mayor longitud habrá mayor resistencia. Por lo tanto en el caso de mediciones de voltaje que no sean a los bornes del motor, se deberá considerar la caída de tensión que se calcula mediante la ecuación 4.12.

$$\Delta V_j = R_c * I_c \quad (4.12)$$

4.1.5.3 Análisis de pérdidas de energía en transformadores eléctricos

Las pérdidas de energía eléctrica en un transformador pueden ser de dos tipos:

- Pérdidas en el entrehierro (núcleo).
- Pérdidas en el embobinado (cobre).

Las pérdidas en el núcleo ferromagnético (h_{fe}) son aquellas que se presentan por fallas en el material ferromagnético. Estas pérdidas son independientes de la carga a la que es sometido el transformador y prácticamente invariables a tensión y frecuencia constantes. Estos datos normalmente son proporcionados por el proveedor.

Las pérdidas en el cobre h_{cu} son las que se generan en los devanados del transformador, al circular las corrientes por los mismos. Su valor está determinado por el cuadrado de la corriente y la resistencia eléctrica de los devanados y están directamente relacionadas con el factor de potencia.

Las pérdidas totales son las pérdidas en el núcleo más las pérdidas en el cobre a plena carga, corregidas por el índice de carga elevado al cuadrado. El índice de carga se define como la potencia a la carga dividida entre la potencia a plena carga. En la ecuación 4.13 se presenta la forma de calcular de las pérdidas totales.

$$h_{tot} = h_{fe} + h_{cu} * \left(\frac{P_{rt}}{FP * P_n} \right)^2 \quad (4.13)$$

Donde:

- h_{tot} = Pérdidas totales (kW)
FP = Factor de potencia (adimensional)
 h_{fe} = Pérdidas en el cobre a tensión nominal (kW)
 h_{cu} = Pérdidas en el núcleo a tensión nominal (kW)

- P_n = Potencia nominal del transformador en evaluación (kVA)
 P_{rt} = Potencia real considerando todas las cargas alimentadas por el transformador (kW)

En la Tabla E1 del Anexo E se presentan valores de las pérdidas hfe y hcu a carga nominal para transformadores de capacidades nominales comerciales, que pueden ser utilizados en forma práctica durante el DEE, cuando el fabricante del transformador no proporcione dentro de sus especificaciones esta información.

4.1.6 Aplicación de variadores de velocidad

En aquellos sistemas de agua potable donde la demanda de agua sea variable, como en el caso de los sistemas de bombeo directo a la red de distribución, se recomienda evaluar la opción de aplicar un sistema de velocidad variable en el DEE.

La tarea para evaluar esta posible medida de ahorro, será calcular la energía consumida en función de las variaciones de presión – gasto en la descarga del sistema de bombeo en estudio. Para hacer esta evaluación se recomienda aplicar el siguiente procedimiento:

Paso 1. Realizar un monitoreo en el equipo de bombeo durante 24 horas, con lecturas de al menos cada hora, de los siguientes parámetros:

- Presión de descarga (kg/cm²)
- Caudal (m³/s)
- Potencia eléctrica demandada por el motor (kW)

El registro de datos se podrá hacer en el formato mostrado en la tabla 4.6.

Tabla 4.6 Registro parámetros para evaluación energética de variadores de frecuencia

Fecha	Hora	Presión (kg/cm ²)	Caudal	Potencia (kW)

Paso 2. Una vez que se cuenta con el registro anterior, se puede hacer una estimación rápida de la energía consumida por variaciones de presión por medio de la ecuación 4.14.

$$EE_c = \sum_{i=2}^{n_i} \left[\frac{(P_{e,i} + P_{e,i-1})}{2} * (hr_i - hr_{i-1}) \right] \quad (4.14)$$

Donde:

- EE_c = Energía consumida en el periodo de medición (kWh)
 $P_{e,i}$ = Valor de la potencia eléctrica registrado en la lectura i (kW)
 hr_i = Hora a la que se tomó la lectura i
 n_i = Número total de lecturas tomadas durante el tiempo de monitoreo

Este valor de potencia no es representativo pues depende de la curva de comportamiento de la bomba y en los puntos donde se sitúe (valor de eficiencia), pero con el resultado de este cálculo se podrá realizar una estimación de los ahorros por esta medida como parte de la integración del proyecto de eficiencia energética.

4.1.7 Aspectos de mantenimiento en las instalaciones electromecánicas a observar en el DEE

Durante la elaboración del DEE es necesario revisar si se lleva algún programa de mantenimiento y de qué tipo. En la inspección que se realice a las instalaciones se puede identificar si se monitorean diversos parámetros que muestren una relación predecible de falla con respecto al ciclo de vida de los equipos. Algunos de estos parámetros son los siguientes:

- Vibración de cojinetes.
- Temperatura de las conexiones eléctricas.
- Resistencia del aislamiento de la bobina de un motor.

El principal propósito de la inspección es verificar que los equipos y las instalaciones se encuentren física y funcionalmente en buen estado. Ahora desde el punto de vista del consumo de energía se busca que los equipos “mantengan” sus eficiencias originales. El problema de mantenimiento más común es la ocurrencia de fugas en los estoperos de los equipos de bombeo como se muestra en la figura 4.11.

Figura 4.11 Problemas típicos de falta de mantenimiento en equipos de bombeo



Este problema es recurrente y reduce de manera significativa la eficiencia porque incrementa las pérdidas (internas y externas) de la bomba tal y como se explicó en el inciso 4.1.3.1 de este Manual.

condiciones operativas y de mantenimiento obtenida durante el DEE, con su respectivo análisis beneficio-costos.

4.2 Proyecto de eficiencia energética

El proyecto de eficiencia energética (PEE) consiste en desarrollar la cartera de proyectos y recomendaciones a implementar en las instalaciones electromecánicas y de distribución de agua potable, con oportunidades posibles de ahorro de energía eléctrica, tanto en consumo como en aquellas que solamente reduzcan el costo de la facturación energética. El PEE está basado en el análisis de la información obtenida, los análisis de eficiencias en

4.2.1 Metodología para elaborar el proyecto de eficiencia energética (PEE) y determinación de medidas de ahorro

Para la elaboración del PEE se propone seguir una secuencia ordenada, empezando por las acciones que tengan mayor impacto en el ahorro en el consumo energético y posteriormente con aquellas medidas que mejoren la gestión energética, reduzcan los costos y mejoren la administración de la energía. La metodología general propuesta se describe en la figura 4.12.

Figura 4.12 Metodología para desarrollar un PEE en sistemas de agua potable y saneamiento



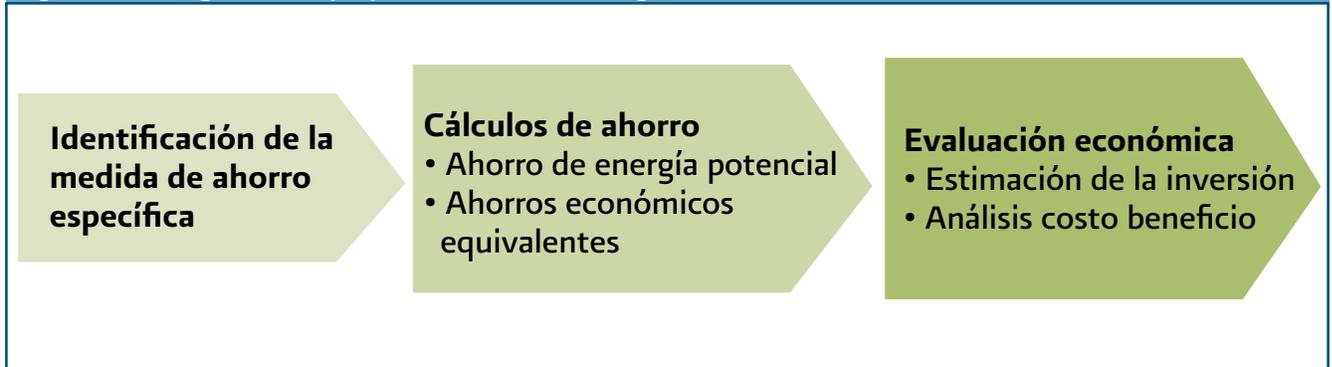
En general, las acciones están orientadas a controlar y optimizar las variables que afectan el consumo y costo energético. Algunas de ellas se indican a continuación:

- 1) El caudal a suministrar
- 2) La carga que soportan las líneas de conducción en el bombeo (Esta variable depende de factores físicos y topográficos, pero es susceptible de modificar u optimizar a través de técnicas como la sectorización y la modelación hidráulica.)

- 3) La optimización de la eficiencia en que los equipos pueden operar
- 4) La disminución de tiempos de operación de los equipos de bombeo
- 5) El mantener constantes ó a la baja los parámetros electromecánicos de las instalaciones

Los pasos a seguir para la integración de proyectos de ahorro de energía se describen en la Figura 4.13

Figura 4.13 Integración del proyecto de ahorro de energía



Para fines de este Manual, las medidas de ahorro se han dividido en 3 tipos:

1) Medidas que reducen directamente el consumo de energía

Éstas influyen directamente en el indicador de consumo específico de energía eléctrica (IE, expresado en kWh/m³ producido), y están relacionadas con la disminución de las pérdidas de energía en los diferentes procesos de transformación y conducción en los sistemas eléctrico, motriz y de distribución hidráulica.

2) Medidas que reducen el costo energético

Éstas únicamente influyen en el costo específico de la energía (CUE, expresado \$/kWh), y están enfocadas en sacar el máximo provecho de la estructura tarifaria para pagar menor cantidad de dinero por la energía eléctrica consumida.

3) Medidas que derivan de la optimización de la operación hidráulica

Éstas resultan de los proyectos de eficiencia física e hidráulica, incluyen tanto medidas de reducción del consumo como del costo energético.

Los indicadores IE y CUE están descritos de manera más detallada en la sección seis de este Manual.

En esta sección se describen las metodologías para la identificación y cálculo de ahorros de las medidas tipo 1 y 2, y en la sección cinco se describen las del tipo 3.

En la tabla 4.7 se listan por sistema las principales medidas genéricas y específicas de ahorro de energía que se deben evaluar como parte del proyecto de eficiencia energética. Asimismo, se incluye una clasificación de acuerdo al nivel típico de inversión asociada.

Los métodos de evaluación y sus respectivas bases teóricas, así como los criterios a aplicar se describen a continuación, siguiendo el orden y la lógica descritos en la figura 4.15 y tabla 4.7:

Tabla 4.7 Principales medidas de ahorro de energía a evaluar

4.2.2 Medidas que reducen el consumo energético			
Sistema	Medida genérica	Medida específica	
Sistema motor-bomba	4.2.2.1 Optimización de la eficiencia electromecánica	Baja Inversión	Adecuación del equipo de bombeo a los puntos de operación reales
			Ajuste de la posición de los impulsores en bombas de turbina con impulsor semiabierto
		Media Inversión	Sustitución del motor ó bomba
			Sustitución del conjunto motor – bomba
	4.2.2.2 Mantenimiento predictivo y preventivo	Baja Inversión	Monitoreo periódico de parámetros mecánicos como vibración, temperaturas, etc.; y los relacionados con la eficiencia electromecánica
			Lubricación de equipos, sustitución de sellos, apriete de tornillería, chequeo de alineación, ajuste de conexiones, sustitución de componentes menores de equipos
Sistema de distribución hidráulica	4.2.2.3 Optimización de cargas de bombeo	Baja Inversión	Corrección de defectos en la configuración de tuberías de descarga y en la operación
		Alta Inversión	Reducción de pérdidas por cortante en conducciones (sustitución de conducciones ó adecuaciones)
	4.2.2.4 Control de presiones y caudales	Media Inversión	Instalación de variadores de velocidad para el funcionamiento de los equipos de bombeo
		Alta Inversión	Instalación de tanques de regulación
Sistema eléctrico	4.2.2.5 Optimización de las instalaciones eléctricas	Baja Inversión	Optimización del factor de potencia
			Corrección de los desbalances de voltaje (conexiones, sustitución de conductores)
			Corrección del voltaje de suministro al motor, (valor nominal o de placa)
		Media Inversión	Reducción de pérdidas eléctricas por efecto Joule (sustitución de conductores y equipos)
4.2.3 Medidas que reducen el costo energético			
4.2.3.1 Medidas administrativas de reducción de costo energético		Baja Inversión	Selección de tarifa eléctrica a contratar por la que resulte más económica de entre las opciones en media tensión
			Control manual de la demanda en hora punta
4.2.3.2 Medidas de inversión		Media Inversión	Control automático de la demanda
		Alta Inversión	Cambio de la tarifa eléctrica en media tensión por una tarifa en alta tensión

4.2.2 Medidas de optimización del consumo energético

A. Conjunto motor - bomba

4.2.2.1 Optimización de la eficiencia electromecánica

En este apartado se buscará incrementar la eficiencia electromecánica del conjunto motor-bomba ó de alguno de los componentes (motor ó bomba), para ello se deberán analizar todas las acciones que pueden aplicar seleccionando e implantando aquellas que resulten técnica y económicamente factibles.

4.2.2.1.1 Adecuación del equipo de bombeo al punto de operación real

El procedimiento para determinar una recomendación de este tipo consiste en definir al menos dos puntos (carga- gasto) donde opere el equipo de bombeo. Posteriormente se deberán analizar las características del equipo instalado (curva de operación) y evaluar si es recomendable una adecuación del mismo a las condiciones de operación (carga – gasto), tratando de hacerlo operar en el intervalo de máxima eficiencia.

En la tabla 4.7 se indican algunas acciones que pueden efectuarse para incrementar la eficiencia de la bomba, según la problemática.

• Metodología de cálculo:

Paso 1. Con la ecuación 4.4 se deberá calcular la potencia hidráulica que demandará el motor una vez implementada la acción correctiva, posteriormente se determinará con base en el factor de carga del motor, la potencia que deberá suministrar al equipo de bombeo y con ello determinar en su curva de eficiencia el nuevo punto de operación. Con este valor se determina mediante la ecuación 4.15 un nuevo valor de eficiencia y con ello la potencia eléctrica del motor.

$$P_h = \frac{H_b * Q * \rho * g}{1000} \quad (4.4)$$

$$P'_e = P_h / \eta'_m \quad (4.15)$$

Donde:

- P_h = Potencia hidráulica demandada por la nueva condición (kW)
- P'_e = Potencia eléctrica que demandará el motor propuesto (kW)
- η_m = Eficiencia de operación del motor en condición anterior (%)
- η'_m = Eficiencia de operación del motor nueva condición (%)

Tabla 4.7 Acciones recomendadas para ajustar las curva del equipo de bombeo a la condición real de operación

Tipo de bomba	Ubicación del punto de operación	Acción correctiva
Vertical multietapa	Por abajo de la curva de la bomba	Incrementar etapas, hasta lograr hacer pasar la curva de la bomba por el punto de operación (aumento de carga)
		Sustituir los impulsores por nuevos impulsores de mayor diámetro, siempre que sea posible
	Por arriba de la curva de la bomba	Eliminar etapas, hasta lograr hacer pasar la curva de la bomba por el punto de operación
		Recortar los impulsores al tamaño requerido, para que la curva de la bomba pase por el punto de operación
Horizontal	Por abajo de la curva de la bomba	Sustituir los impulsores por nuevos impulsores de mayor diámetro, siempre que sea posible
	Por arriba de la curva de la bomba	Recortar los impulsores al tamaño requerido, para que la curva de la bomba pase por el punto de operación

Paso 2. Calcular los ahorros por lograr.

Con la condición inicial de potencia (P_e antes del ajuste de la bomba) y con la nueva potencia eléctrica determinada anteriormente, se deberá obtener el diferencial de potencia y energía consumida en el periodo de tiempo mediante las siguientes expresiones:

- Disminución de la potencia eléctrica demandada ΔP_e :

$$\Delta P_e = P_e - P'_e \quad (4.16)$$

- Disminución de la energía eléctrica consumida ΔE :

$$\Delta E = \Delta P_e * hr_{oa} \quad (4.17)$$

Donde hr_{oa} es el número de horas de operación anual

- Disminución de la facturación eléctrica ΔF :

$$\Delta F = \Delta E - CUE \quad (4.18)$$

Donde CUE es el costo unitario de la energía (\$/kWh)

4.2.2.1.2 Ajuste de la posición de los impulsores en bombas de turbina con impulsor semiabierto

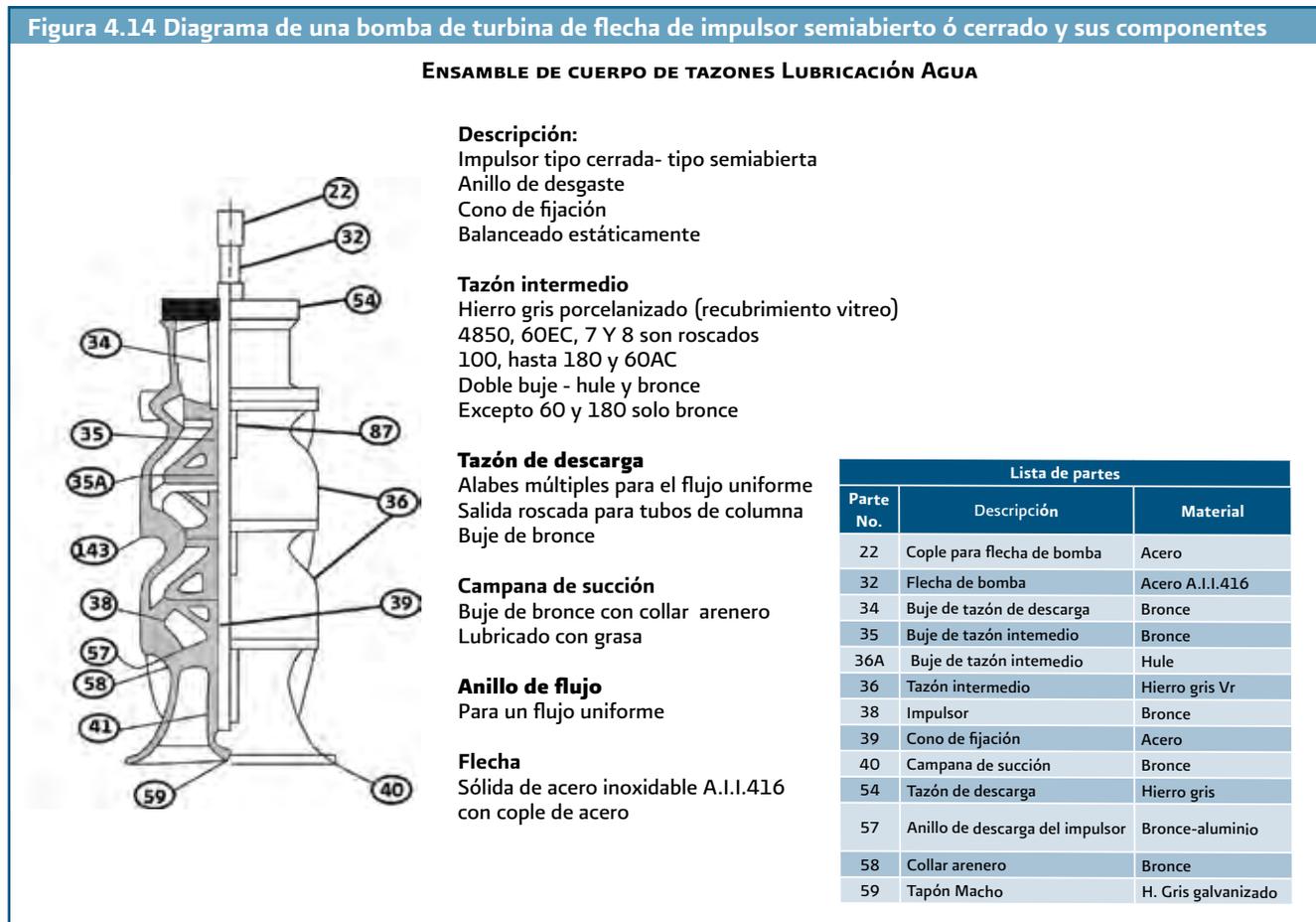
- **Situación observada durante el diagnóstico:**

La bomba tipo turbina vertical, con impulsores abiertos presenta baja eficiencia de operación.

- **Acciones a implantar:**

Ajustar la flecha con los impulsores dentro del cuerpo de tazones, levantando o bajando la flecha por medio de la tuerca de ajuste. En la figura 4.14 se muestra el arreglo de los impulsores dentro del cuerpo de tazones de la bomba.

Figura 4.14 Diagrama de una bomba de turbina de flecha de impulsor semiabierto ó cerrado y sus componentes



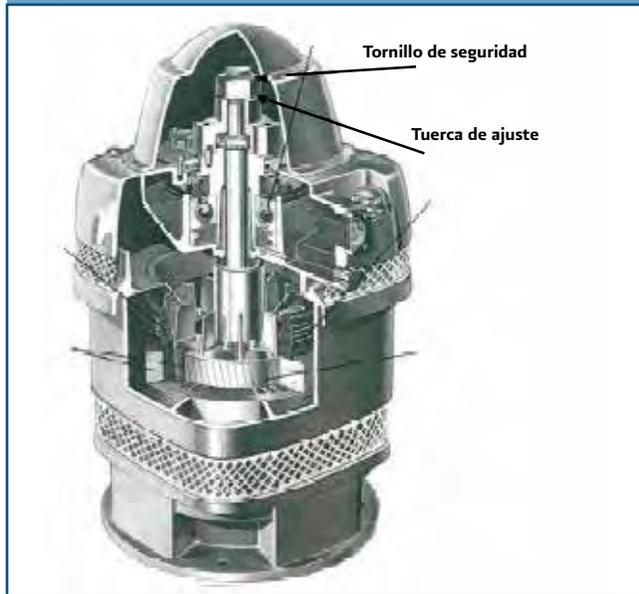
(Fuente: Manual de Bombas Verticales BNJ S.A. de C.V.)

Este ajuste se calibra en la flecha desde la instalación del equipo, siguiendo las indicaciones del fabricante. Si la posición de los impulsores, no quedó bien ajustada o se ha desajustado con el tiempo, se provoca una reducción de la eficiencia de la bomba.

El procedimiento para ajustar la flecha a la posición de diseño es el siguiente:

Paso 1. Quitar la tapa del motor vertical, para descubrir la tuerca de ajuste de la flecha (ver fig. 4.15)

Figura 4.15 Diagrama de un motor flecha hueca acoplado a una bomba de turbina



(Fuente: Manual de operación Byron Jackson para bombas de turbina)

Este ajuste se calibra en la flecha desde la instalación del equipo, siguiendo las indicaciones del fabricante. Si la posición de los impulsores, no quedó bien ajustada o se ha desajustado con el tiempo, se provoca una reducción de la eficiencia de la bomba.

El procedimiento para ajustar la flecha a la posición de diseño es el siguiente:

Paso 1. Quitar la tapa del motor vertical, para descubrir la tuerca de ajuste de la flecha (ver fig. 4.15)

Paso 2. Desmontar el tornillo de seguridad, que impide se mueva la tuerca.

Paso 3. Una vez que la tuerca esté libre, se deberá aflojar hasta el momento que ya no sostiene el peso de la flecha. En ese momento se aprieta en forma manual hasta el tope. Cuando esto sucede, se toma la

medida del sobrante de flecha por encima del nivel de la tuerca.

Paso 4. Se procede a levantar la flecha por medio del ajuste de la tuerca hasta el tope superior en el tazón, tomando nuevamente la medida correspondiente. La diferencia será el juego total que tienen los impulsores dentro del cuerpo de tazones. Este valor debe coincidir con el proporcionado por el fabricante. De no ser así indica desgaste del impulsor con el tazón.

Paso 5. Para realizar el ajuste se debe aflojar nuevamente la flecha al tope donde el impulsor asienta con el tazón. Una vez realizado esto, se debe ajustar la flecha de acuerdo a las especificaciones del fabricante, mediante el apriete de la tuerca, subiendo la distancia recomendada por el fabricante (dependiendo de la elongación de la flecha, la cual depende del diámetro y longitud de la flecha y de la carga hidráulica).

• Metodología de cálculo:

Paso 1. Determinar la eficiencia η con la que queda trabajando la bomba una vez realizado el ajuste a la posición de la flecha siguiendo el procedimiento de cálculo descrito en la sección 4.1.3.2.

Paso 2. Calcular la potencia eléctrica que demandará el equipo una vez implementada la acción correctiva.

Paso 3. Calcular los ahorros por lograr.

Nota.- Los pasos dos y tres se calculan de igual forma que en la sección 4.2.2.1.1.

4.2.2.1.3 Optimización de la eficiencia del motor

En el diagnóstico de la eficiencia de los motores eléctricos en operación, se requiere hacer un análisis de las posibles causas que la afectan, dependiendo de la condición anómala encontrada. Un resumen de estas posibles causas se detalló en las tablas 4.2 y 4.3; en la tabla 4.9 se presentan acciones correctivas que se pueden implementar para los motores que trabajan en condiciones de operación ineficiente.

Tabla 4.9 Acciones a implementar para la corrección de la operación ineficiente de los motores eléctricos

Condición observada	Diagnóstico	Acción correctiva propuesta a evaluar su implantación
Voltaje de alimentación por debajo del nominal	El voltaje en el punto de acometida está por debajo del nominal	a) Aumentar el voltaje secundario con los TAP's del transformador. (Los TAP's son los componentes físicos en forma de manija (cambiadores) de un transformador que se utilizan para graduar la relación de transformación del voltaje de entrada y salida) b) Solicitar al suministrador corrija el problema
	El voltaje en el punto de acometida presenta variaciones mayores al 5%.	a) Solicitar al suministrador corrija el problema
	El voltaje en el punto de acometida es el nominal y no presenta variaciones significativas.	a) Corregir con los TAP's del transformador b) Practicarle un diagnóstico y mantenimiento al transformador
Desbalance del voltaje de alimentación al motor	El voltaje en el punto de acometida está desbalanceado.	a) Solicitar al suministrador corrija el problema
	El voltaje en la acometida está balanceado y en el secundario del transformador desbalanceado.	a) Practicar un diagnóstico y mantenimiento al transformador
	El voltaje en los bornes del secundario del transformador está balanceado y en la alimentación al motor se encuentra desbalanceado.	a) Revisar la conexión de puesta a tierra del transformador y el motor, y en caso de que se detecten problemas, corregirlos b) Revisar las conexiones del CCM, arrancador y motor, y en caso de que se detecten problemas, corregirlos c) Corregir desbalance de cargas en la instalación
Desbalance en la corriente demandada por el motor	El desbalance en corriente es inversamente proporcional al desbalance en voltaje.	a) Corregir el desbalance en voltaje
	El desbalance es producido por una demanda desbalanceada por las fases del motor.	a) Si el desbalance es menor al 5%, practicarle un mantenimiento al motor b) Si el desbalance es mayor al 5%, sustituir el motor por un motor nuevo (preferentemente de alta eficiencia)
La velocidad de operación del motor está por debajo de la velocidad a plena carga	Problemas con rodamientos y/o cojinetes	a) Lubricar y en su caso sustituir los elementos con problemas
Alta temperatura y/o alta vibración en cojinetes y/o rodamientos		
El motor es de eficiencia estándar y tiene más de 10 años de operación	La eficiencia de operación del motor es baja.	a) Sustituir el motor actual por un motor nuevo de alta eficiencia de una capacidad tal, que opere cerca del 75% de su capacidad
El motor ha sido reparado (rebobinado) más de dos veces	La eficiencia del motor se encuentra depreciada.	
El motor se encuentra trabajando con un factor de carga menor al 45%	El motor se encuentra trabajando en una zona donde su eficiencia de operación es baja.	
El motor se encuentra trabajando con un factor de carga mayor al 100%	El motor se encuentra trabajando en una zona donde su eficiencia de operación es baja.	

La aplicación de estas acciones puede mejorar sustancialmente la eficiencia de un motor eléctrico, y con ello reducir las pérdidas energéticas, por ejemplo, la reducción del 30% en las pérdidas de un motor de 10 HP con 82% de eficiencia, incrementa su valor a un 87.4%, lo cual también puede representar un beneficio significativo en el consumo energético.

Dentro de esta gama de acciones, las más recurrentes y sus respectivas recomendaciones se describen a continuación:

4.2.2.1.3.1 Corregir los desbalances de voltaje

- **Situación observada durante el diagnóstico:**

Existe un desbalance de voltaje en la alimentación eléctrica al motor, y por lo tanto está trabajando con una eficiencia depreciada.

- **Acciones a implantar:**

Dependiendo del origen del desbalance en voltaje, implantar las acciones que se indican en la tabla 4.10.

Tabla 4.10 Acciones recomendadas para corregir el desbalance de voltaje de alimentación a los motores eléctricos

Origen del desbalance de voltaje	Acciones correctivas a implantar
Desbalance en la corriente demandada por el motor, la que produce una caída de tensión en cada fase, y por lo tanto el desbalance en voltaje	Dar mantenimiento al motor, y en caso de que el daño sea irreversible, sustituir el motor por un motor nuevo de alta eficiencia
Desbalance de origen en la alimentación de la compañía suministradora	Solicitarle a la compañía suministradora la corrección del problema
Desbalance originado por el transformador de la subestación propia	Practicar un mantenimiento al transformador, y en caso de que el daño sea irreversible, sustituir el transformador por un transformador nuevo de bajas pérdidas
Desbalance originado por un desbalance en las cargas del transformador	Balancear las cargas del transformador

- **Metodología de cálculo:**

Para calcular los beneficios derivados de la corrección del desbalance de voltaje en motores se debe de desarrollar los siguientes cálculos:

Paso 1. Calcular la eficiencia a la que trabajará el motor, una vez corregido el desbalance de voltaje, siguiendo el procedimiento descrito en la sección 4.1.2.

Paso 2. Calcular la potencia eléctrica que demandará el equipo una vez implementada la acción correctiva, mediante la siguiente ecuación 4.15.

Paso 3. Calcular los ahorros a lograrse. Se calculan de igual forma que en la sección 4.2.2.1.1.

Corregir el voltaje de suministro al motor

- **Situación observada durante el diagnóstico:**

Al motor se le está suministrando energía con un voltaje distinto al nominal y por lo tanto está trabajando con una eficiencia depreciada.

- **Acciones a implantar:**

Si el problema puede ser resultado ajustando los TAP's del transformador, aplicar dicho ajuste. En caso de que el problema sea ocasionado por la compañía suministradora, solicitar a ésta, que resuelva el problema.

- **Metodología de cálculo:**

Paso 1. Calcular la eficiencia a la que trabajará el motor, una vez corregido el problema de suministro de voltaje, siguiendo el procedimiento descrito en la sección 4.1.2.

Paso 2. Calcular la potencia eléctrica que demandará el equipo una vez implementada la acción correctiva, mediante la ecuación 4.15.

Paso 3. Calcular los ahorros a lograrse. Se calculan de igual forma que en el punto 4.2.2.1.1.

4.2.2.1.3.2 Sustitución del motor eléctrico por un motor de alta eficiencia

Esta medida es recomendable cuando se han agotado las posibles acciones que no impliquen la inversión que representa la sustitución del motor y se presenten las causas descritas en la tabla 4.7. Esta medida es altamente recomendable cuando el motor sufre una falla y es necesario repararlo.

• **Metodología de cálculo:**

Para evaluar los beneficios y rentabilidad de esta medida se siguen los siguientes pasos:

Paso 1. Calcular la eficiencia a la que trabaja el motor actual, siguiendo el procedimiento descrito en la sección 4.1.2.1. Idem paso 1 anterior.

Paso 2. Proponer un motor nuevo de alta eficiencia y especificar su valor de eficiencia respectiva.

Los motores de alta eficiencia se diferencian de los motores estándar por las siguientes características:

- a) Utilización de acero con mejores propiedades magnéticas
- b) Reducción del entrehierro
- c) Reducción del espesor de la laminación
- d) Incremento en el calibre de los conductores
- e) Utilización de ventiladores y sistemas de enfriamiento más eficientes
- f) Utilización de mejores materiales aislantes

Paso 3. Cálculo de los ahorros de energía a obtener.

Se cotiza el motor de alta eficiencia propuesto y se evalúa la rentabilidad siguiendo el procedimiento descrito en la sección 4.2.3.

4.2.2.1.4 Sustitución del conjunto bomba - motor

Esta medida es recomendable cuando la eficiencia electromecánica haya resultado sustancialmente baja y el potencial de ahorro de energía con respecto a las NOM's determinado durante el DEE haya resultado de al menos el 20%. Es sabido que dicho potencial de ahorro de energía es incluso mejorable con equipos comercialmente disponibles.

También es importante revisar los valores de eficiencia estimados para los motores eléctricos por separado. El criterio general es que si el potencial para mejorar la eficiencia de los motores rebasa el 5%, es todavía más recomendable la sustitución del conjunto bomba-motor dado que el potencial de ahorro se asegura en ambos componentes y la medida puede ser sumamente rentable.

• **Metodología de cálculo:**

El procedimiento para evaluar el ahorro y rentabilidad de esta medida es el siguiente:

Paso 1. Calcular el costo anual de la energía consumida por el conjunto motor-bomba en operación.

Proponer una nueva bomba que trabaje en la zona de

máxima eficiencia y calcular la eficiencia electromecánica cumpliendo las siguientes recomendaciones:

- Seleccionar el motor apropiado a la bomba seleccionada cuidando que el factor de carga esté entre el 70 y 80 %
- Verificar la eficiencia del motor y de la bomba seleccionados
- Calcular la eficiencia electromecánica combinando ambas eficiencias por medio de la ecuación 4.19

$$\eta_{em} = \eta_b * \eta_m \tag{4.19}$$

Paso 3. Calcular la potencia eléctrica que demandará el equipo una vez implementada la acción correctiva, mediante la ecuación 4.20.

$$P'_{emb} = P_{emb} * \frac{\eta_{em}}{\eta'_{em}} \tag{4.20}$$

Donde:

P'_{emb} = Potencia eléctrica esperada del conjunto motor-bomba de mejor eficiencia

P_{emb} = Potencia eléctrica que demanda el conjunto motor-bomba actualmente

η_{em} = Eficiencia actual del conjunto motor-bomba

η'_{em} = Eficiencia esperada del conjunto motor-bomba

Paso 4. Calcular de los ahorros a obtener de acuerdo al procedimiento de la sección 4.2.2.1.1

Paso 5. Cotizar el conjunto motor – bomba propuesto y evaluar la rentabilidad siguiendo el procedimiento descrita en la sección 4.2.3

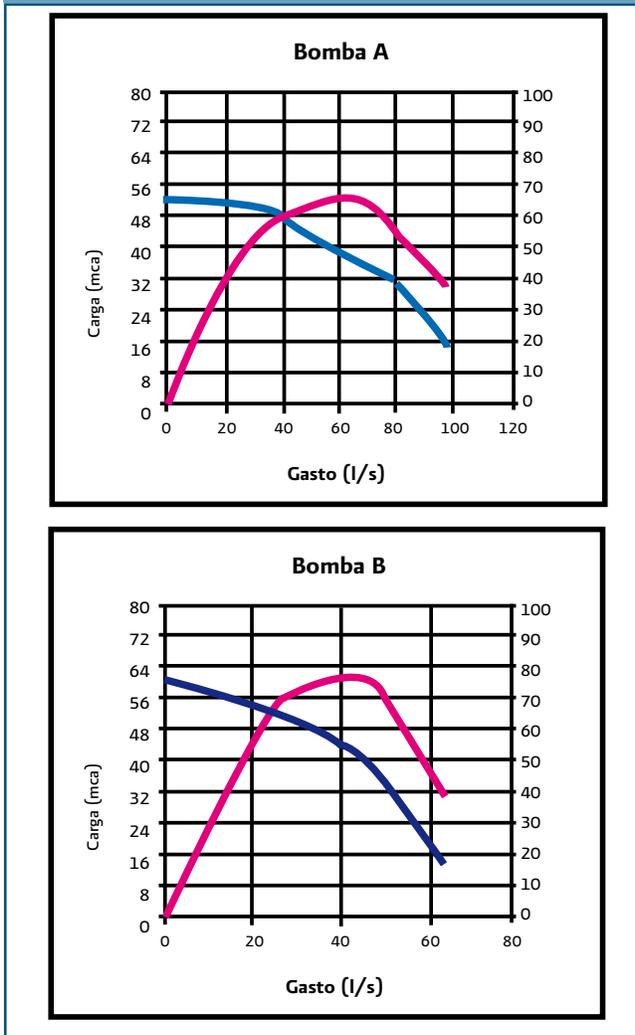
• **Recomendaciones para la selección de la bomba:**

Para aumentar las posibilidades de éxito y asegurar el ahorro de energía proyectado, es importante seleccionar el equipo de bombeo entre varias marcas comerciales disponibles, tomando en cuenta lo siguiente:

- a) No calcular márgenes de seguridad irreales o incluir en la especificación información inapropiada.
- b) Si la bomba tiene que operar en más de un punto de carga hidráulica-gasto, hay que seleccionarla para que en ambos puntos presente

una eficiencia “razonablemente alta”. Como ilustración de esta recomendación, se muestra en la figura 4.16 el ejemplo de dos equipos de bombeo que tienen curvas de operación diferentes. Como se puede ver, la bomba “B”, con una curva más plana sería la adecuada para la aplicación de cambios frecuentes en el nivel dinámico, mientras que la bomba “A” sería más favorable cuando es más estable el nivel.

Figura 4.16 Curvas típicas de dos equipos de bombeo con curvas H-Q diferentes



Se recomienda que una vez instalado el equipo, se verifique el punto de operación del mismo, y en caso de no cumplir con la selección, revisar la instalación y verificar los ajustes que deban de hacerse al equipo.

4.2.2.2 Mantenimiento predictivo y preventivo

Como parte del PEE, se debe recomendar la implementación de un programa de mantenimiento predictivo y preventivo. Dentro de los principales beneficios que se obtienen con un buen programa de mantenimiento a las instalaciones, se tienen:

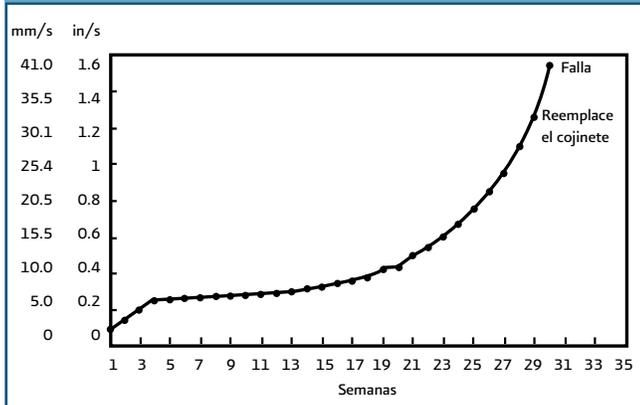
- a) Mayor disponibilidad del equipo.
- b) Mayor capacidad de bombeo.
- c) Mayor confiabilidad en el equipo.
- d) Operación mejor planeada y más eficiente.
- e) Mejor servicio a la población.
- f) Menor estrés del personal.
- g) Disminución de costos de operación y administración.
- h) Incremento de la vida útil de los equipos.
- i) Disminución de los requerimientos de inversión.
- j) Ahorro de energía.
- k) Ahorro económico.

El mantenimiento predictivo consiste en establecer, en primer lugar, una perspectiva histórica de la relación entre la variable seleccionada y la vida del componente. Para esto se recomendará la toma de lecturas de los parámetros más importantes para predecir fallas y actuar en consecuencia de manera oportuna. Desde el punto de vista del consumo de energía, se trata de que los equipos “mantengan” sus eficiencias originales. Los parámetros que se recomienda monitorear son los siguientes:

- Monitoreo periódico de parámetros relacionados con la eficiencia electromecánica.
- Monitores de parámetros mecánicos como vibración y temperaturas.

El monitoreo de vibraciones de los conjuntos bomba – motor es fundamental para detectar fallas antes de que sucedan. Por ejemplo, el monitoreo de la vibración de un cojinete puede ayudar a tomar la determinación de cambiarlo antes de que falle. En la figura 4.17 se muestra el comportamiento típico de los valores medidos antes de la falla.

Figura 4.17 Curva típica de comportamiento de vibraciones antes de la falla de un cojinete



En la figura 4.18 se muestra una inspección típica de nivel de vibración y el equipo típico utilizado en la misma.

Figura 4.18 Medición en campo de nivel de vibraciones en un sistema de bombeo



B. Sistema de distribución hidráulica

4.2.2.3 Optimización de cargas de bombeo

4.2.2.3.1 Corrección de defectos en la configuración de tuberías de descarga y en la operación

- **Situación observada durante el diagnóstico:**

Este punto aplica para aquellos sistemas de bombeo que durante el DEE se haya detectado algún problema en la configuración de su tubería de descarga que esté ocasionando el bajo rendimiento energético de alguno o todos los equipos involucrados, como recirculaciones in-

necesarias, contrapresiones que eviten el flujo adecuado desde un equipo determinado, entre otras.

- **Acciones a implantar:**

Las recomendaciones en este caso será la modificación de los trenes de descarga o configuración de las conducciones primarias para evitar los problemas mencionados.

- **Metodología de cálculo:**

Esta va a depender de la situación que se haya encontrado, que puede derivar por ejemplo, en una mejora en el caudal producido o evitar la operación de un equipo que no esté siendo productivo.

4.2.2.3.2 Reducción de pérdidas por cortante en conducciones

La reducción de pérdidas por el efecto cortante del agua sobre las paredes de la tubería se aplica para disminuir el impacto energético que representan las conducciones con altas velocidades, que en algunos casos pueden alcanzar el 30% de la potencia demandada por el equipo de bombeo.

- **Situación observada durante el diagnóstico:**

La velocidad del agua dentro de la tubería es superior a las 2.0 m/s.

- **Acciones a implantar:**

Evaluar las acciones descritas a continuación y seleccionar aquella que resulte más rentable.

- Si la tubería ya tiene varios años en operación y se encuentra en mal estado, proponer la sustitución de la tubería actual por una de mayor diámetro, con la que se logren velocidades del agua entre 1.0 y 1.5 m/s.
- Si la tubería se encuentra en buen estado, analizar las siguientes opciones:
 - Instalar una tubería en paralelo a la actual, de un diámetro tal, que se reduzca la velocidad del agua a un valor de entre 1.0 y 1.5 m/s.
 - Sustituir la tubería actual por una de mayor diámetro, con la que se logren velocidades del agua de entre 1.0 y 1.5 m/s.

Metodología de cálculo:

Paso 1. Calcular las pérdidas por cortante, que se tienen en la tubería actual y en la tubería propuesta, mediante la metodología descrita en la sección E.2 del anexo E.

Paso 2. Calcular la disminución de la potencia eléctrica demandada por el motor, mediante la ecuación 4.21.

$$\Delta P_e = \frac{[(h_{fta} - h_{ftp}) * Q * \rho * g]}{\eta_{em} * 1000} \quad (4.21)$$

Donde:

ΔP_e = Disminución de la potencia eléctrica demandada

h_{fta} = Pérdidas por cortante en la tubería actual (m)

h_{ftp} = Pérdidas por cortante en la tubería propuesta (m)

Q = Caudal que pasa por la tubería (m³/s)

ρ = Peso específico del agua (kg/m³)

g = Aceleración de la gravedad (m/s²)

η_{em} = Eficiencia electromecánica del sistema de bombeo involucrado

Paso 3.- Calcular los ahorros de energía eléctrica de igual forma que en la sección 4.2.2.1.1 de este Manual.

Paso 4.- Cotizar la obra implícita para el cambio de la tubería propuesta y evaluar la rentabilidad siguiendo la metodología descrita en el apartado 4.2.3.

4.2.2.4 Control de presiones y caudales

En esta sección, se analizarán las medidas de ahorro de energía resultantes de controlar la presión y los caudales en las redes de distribución.

4.2.2.4.1 Instalación de variadores de frecuencia

• Situación observada durante el diagnóstico:

En aquellos sistemas con suministro directo a red, donde la demanda de agua es variable y que durante la evaluación de consumos energéticos por estas variaciones hayan resultado atractivos durante el DEE, fundamentalmente por sus niveles de consumo y costo energético,

se recomienda proponer y evaluar la opción de aplicar un sistema de velocidad variable en el equipo de bombeo.

• Acciones a implantar:

Implementar un sistema de control de presión y caudal por medio de un variador de frecuencia electrónico adaptado al motor eléctrico

• Metodología de cálculo:

Para implementar correctamente esta medida y calcular los ahorros resultantes de la misma se procede de la forma siguiente:

Paso 1. Seleccionar los equipos resultantes como viables en el DEE y considerar sus consumos energéticos operando sin variador de frecuencia así como las presiones y caudales registrados durante los monitoreos realizados durante el mismo.

Paso 2. Seleccionar la presión óptima de operación para cada sistema de distribución de agua potable, en función de lo siguiente:

- i) La presión óptima de operación es la presión más baja a la que podría operar el sistema sin dejar de proporcionar el servicio en ningún punto de la red. Ésta suele ser el valor más bajo registrado durante el monitoreo, por lo que habrá que verificar en campo o en un modelo de simulación hidráulica, si operando con dicha presión, se sigue suministrando agua en los puntos más altos de dicha red.
- ii) Si con la presión mínima registrada en el monitoreo, se logra que el agua llegue bien a todos los puntos de la red, verificar en campo, hasta que valor es posible bajar la presión, sin menoscabo del servicio. Dicho valor de la presión será la presión óptima de operación.
- iii) Si con la presión mínima registrada en el monitoreo, no se cumple que el agua llegue bien a todos los puntos de la red, verificar en campo, hasta que valor es necesario subir la presión, para que el agua alcance la presión adecuada en todos los puntos de la red. Dicho valor de la presión, será la presión óptima de operación.

Paso 3. Calcular la energía eléctrica que se ahorrará de acuerdo con lo siguiente:

- i) Calcular el perfil de presión disminuida.
Para cada uno de los registros obtenidos durante el monitoreo, calcular la disminución de la carga (presión de descarga), mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Si } p_{op} > p_r \Rightarrow \Delta p_r = 0.0$$

$$\text{Si } p_{op} < p_r \Rightarrow \Delta p_r = p - p_{op}$$

Donde:

p_{op} = Presión óptima de operación (kg/cm²)

p_r = Presión registrada en el monitoreo (kg/cm²)

Δp_r = Disminución de la presión para ese registro (kg/cm²)

- ii) Calcular el perfil de potencia eléctrica ahorrada.
Para cada uno de los registros obtenidos durante el monitoreo, calcular la potencia eléctrica que se ahorrará con la instalación de un variador de velocidad que mantenga la presión en el valor óptimo obtenido en el paso anterior, mediante la ecuación 4.22.

$$\Delta P_e = \frac{\Delta p_r * Q * 9.81}{\eta_{em}}$$

(4.22)

Donde:

ΔP_e = Potencia eléctrica ahorrada (kW)

Δp_r = Disminución de la presión de descarga (m.c.a.)

Q = Caudal (l/s)

η_{em} = Eficiencia electromecánica del conjunto motor-bomba

- iii) Calcular la energía ahorrada con la ecuación 4.23.

$$\Delta E = \sum_{i=2}^{n_{im}} \left[\frac{(P_{e,i} + P_{e,i-1})}{2} * (hr_i - hr_{i-1}) \right]$$

(4.23)

Donde:

ΔE = Energía ahorrada en el periodo de medición (24 horas)

$\Delta P_{e,i}$ = Potencia eléctrica ahorrada en la lectura i

hr_i = Hora a la que se tomo la lectura i

n_{im} = Número total de lecturas tomadas durante el tiempo de monitoreo

- iv) Calcular los ahorros anuales que se obtendrán con la implantación de la medida con la ecuación 4.24.

$$A\$ = \Delta E * CUE$$

(4.24)

Donde:

$A\$$ = Ahorro económico anual que se obtendrá con la implementación del variador (\$/año)

ΔE = Energía anual que es viable ahorrar con la implementación del variador (kWh/año)

CUE = Costo unitario de la energía (\$/kWh)

Una vez determinados los ahorros de energía eléctrica, se estima el monto de las inversiones necesarias para la implantación de esta medida de ahorro y se realiza la evaluación económica del proyecto de inversión, siguiendo la metodología descrita en el apartado 4.2.3.

4.2.2.4.2 Instalación de tanques de regulación

Es posible que en algunas situaciones donde se esté suministrando agua directamente a la red, se requiera la instalación de un tanque de regulación para reducir la capacidad del sistema de bombeo trabajando a gasto medio y por ende la potencia eléctrica del mismo. Esta situación se analiza de la forma siguiente:

• Situación observada durante el diagnóstico:

El suministro de agua es directo a red con una potencia exigida de acuerdo al gasto máximo horario.

• Acciones a implantar:

Instalar un tanque de regulación o utilizar algún tanque disponible, reduciendo la potencia del equipo de bombeo.

• Metodología de cálculo:

Paso 1. Calcular el caudal y carga hidráulica total que

tendrá el equipo de bombeo trabajado hacia el tanque de regulación.

Paso 2. Calcular la potencia eléctrica que demandará el equipo de bombeo, una vez implementada la acción correctiva, mediante la ecuación 4.25.

$$P'_{eQm} = \frac{(H_{tmb} * Q)'}{H_{tmb} * Q} * P_{eQm} \quad (4.25)$$

Donde:

P'_{eQm} = Potencia eléctrica esperada con el caudal medio

P_{eQm} = Potencia eléctrica que demanda el conjunto motor-bomba actualmente con el caudal medio

$(H_{tmb} * Q)$ = Producto de la carga hidráulica por el caudal, actual del conjunto motor-bomba

$(H_{tmb} * Q)'$ = Producto de la carga hidráulica por el caudal, esperada del conjunto motor-bomba

Paso 3. Cálculo de los Ahorros de energía eléctrica de acuerdo al procedimiento de la sección 4.2.2.1.1.

Paso 4. Cotizar la obra que implica la instalación del nuevo tanque y conjunto motor – bomba propuestos y evaluar la rentabilidad.

C. Sistema eléctrico

4.2.2.5 Optimización de instalaciones eléctricas

Esta medida consiste en corregir los problemas detectados durante la inspección y levantamiento de datos de campo realizados durante el DEE, particularmente de aquellos aspectos que pueden reducir el consumo energético.

Para efectos del proyecto de eficiencia energética, los aspectos más importantes a evaluar son:

- Reducción del desbalance de voltaje.
- Corrección del voltaje de suministro al motor.
- Optimización del factor de potencia.
- Reducción de pérdidas eléctricas por efecto Joule.
- Reducción de pérdidas en transformadores.

Los dos primeros factores se describieron en conjunto con el proyecto de optimización de la eficiencia del motor eléctrico en la sección 4.2.2.1.3 dada su intrínseca relación con este aspecto.

Los otros tres y las acciones a desarrollar dentro del PEE se describen enseguida.

4.2.2.5.1 Optimización del factor de potencia (FP)

El objetivo de esta medida será eliminar los problemas ocasionados por un bajo FP, descritos en la sección 4.1.5.1, y evitar la posible penalización en la factura energética en caso de tener un FP menor al 90 %, así como lograr la máxima bonificación al compensarlo a valores cercanos a la unidad.

• Situación observada durante el diagnóstico:

El factor de potencia en el equipo de bombeo registrado por la compañía suministradora es menor a 0.93.

• Acciones a implantar:

Si el bajo factor de potencia es originado por motores sobredimensionados o trabajando en malas condiciones, sustituir dichos motores, por motores nuevos de alta eficiencia con una capacidad tal que operen alrededor del 75% de carga.

Una vez resuelto el problema de los motores, compensar el factor de potencia con bancos de capacitores, mediante el siguiente procedimiento:

- Medir el factor de potencia.
- Proponer la instalación de un banco de capacitores, con una capacidad tal para elevar el factor de potencia a niveles del orden de 0.97.
- Instalar los capacitores propuestos, corriente abajo del arrancador del motor, de manera tal que únicamente queden energizados, cuando se energice el motor.

• Metodología de cálculo:

Paso 1. Calcular la capacidad requerida del capacitor a proponer, mediante la ecuación 4.26.

$$Cap_0 = P_{edm} \left\{ \frac{\sqrt{1 - FP^2}}{FP} - \frac{\sqrt{1 - (0.97)^2}}{0.97} \right\}$$

(4.26)

Donde:

Cap_0 = Capacidad requerida del capacitor

P_{edm} = Potencia eléctrica demandada por el motor

FP = Factor de potencia del motor medido

Y seleccionar la capacidad Cap_{bc} del banco de capacitores comercial, que más se le aproxime al valor de Cap_c .

Paso 2. Calcular el valor del factor de potencia, que alcanzará la instalación con el banco de capacitores propuesto, mediante la ecuación 4.27.

$$FP' = \frac{P_e}{\sqrt{P_e^2 + (Cap_o - Cap_{bc})^2}} \quad (4.27)$$

Paso 3. Calcular los ahorros de energía eléctrica con el criterio siguiente:

Si $FP > 0.9$:

$$\Delta\$ = \$d_c * 0.225 \left(\frac{1}{FP} - \frac{1}{FP'} \right) \quad (4.28)$$

Si $FP < 0.9$:

$$\Delta\$ = \$d_c * \left(0.85 - \frac{0.54}{FP} - \frac{0.225}{FP'} \right) \quad (4.29)$$

Donde:

$\Delta\$$ = Ahorros en el importe de la facturación eléctrica

$\$d_c$ = Importe promedio por los conceptos de consumo y demanda de energía eléctrica

FP = Factor de potencia actual

FP' = Factor de potencia esperado

Paso 4. Comparar el ahorro económico resultante con el costo de la instalación del banco de capacitores, para evaluar la rentabilidad de dicha medida, siguiendo el procedimiento descrito en la sección 4.2.3.

4.2.2.5.2 Adecuación de calibres de conductores

En caso de que se haya detectado que los conductores que alimentan al motor no son del calibre adecuado ó están dañados, se debe seleccionar un conductor que no solo cumpla con la NOM sino que además ahorre energía.

• Situación observada durante el diagnóstico:

Los conductores eléctricos se encuentran en mal estado y/o sobrecargados o cerca de su límite de capacidad de carga.

• Acciones a implantar:

Sustituir los conductores actuales, por conductores nuevos y de mayor calibre.

Metodología de cálculo:

Paso 1. Utilizar el valor de resistencia del conductor instalado ó mediante el siguiente procedimiento calcular la resistencia unitaria del conductor en las condiciones actuales.

- Medir el voltaje entre fase y neutro, en dos puntos del conductor, separados una distancia LO (mientras mayor sea la distancia, mayor confiabilidad en los resultados).
- Medir con el amperímetro la corriente circulante
- Calcular la caída de voltaje ΔV como la diferencia entre las dos mediciones efectuadas.
- Calcular la resistencia unitaria mediante la ecuación 4.30.

$$R_u = \frac{\Delta V_{\text{voltaje}}}{I * Long} \quad (4.30)$$

Donde:

R_u = Resistencia real del conductor (Ω/m)

$\Delta V_{\text{voltaje}}$ = Caída de voltaje (volts)

I = Corriente (Amperes)

$Long$ = Distancia entre los dos puntos de medición del voltaje (m)

Paso 2. Calcular la disminución de las pérdidas eléctricas en el conductor con la aplicación esta medida de ahorro de energía con la ecuación 4.31.

$$\Delta P_e = \frac{(R_r - R'_r) * I^2 * Long_c}{1000} \quad (4.31)$$

Donde:

- ΔP_e = Disminución de las pérdidas eléctricas (kW)
- R_r = Resistencia real del conductor actual (Ω/m)
- R'_r = Resistencia del conductor propuesto (Ω/m)
- I = Corriente (Amperes)
- $Long_c$ = Longitud total del conductor (m)

Paso 3. Calcular los ahorros de energía eléctrica de igual forma que en la sección 4.2.2.1.1

4.2.2.5.3 Reducción de pérdidas en transformadores

En caso de que durante el DEE se hayan detectado pérdidas significativas de energía eléctrica en el transformador, se debe evaluar el costo para corregir dicha falla. La evaluación se realiza de la forma siguiente:

- **Situación observada durante el diagnóstico:**

Las pérdidas de energía eléctrica en el transformador representan más del 2% del consumo total de la energía.

- **Acciones a implantar:**

Dependiendo de la problemática en particular, se deberán aplicar las acciones indicadas en la tabla 4.11:

- **Metodología de cálculo:**

Paso 1. Calcular la eficiencia con la que trabajará el transformador, siguiendo la metodología de cálculo que se describe en la sección E.2 del Anexo E.

Paso 2. Calcular la disminución de la potencia eléctrica que demandará el transformador una vez implementada la acción correctiva, mediante la ecuación 4.32

$$\Delta P_{et} = \frac{\eta_{trans}}{\eta'_{trans}} P_{et} \quad (4.32)$$

Donde:

- ΔP_{et} = Disminución de la potencia eléctrica esperada
- P_{et} = Potencia eléctrica que demanda el equipo actualmente
- η_{trans} = Eficiencia actual del transformador
- η'_{trans} = Eficiencia esperada del transformador

Paso 3. Calcular los ahorros de energía de igual forma que en la sección 4.2.2.1.1

Tabla 4.11. Acciones recomendadas para mejorar las condiciones en un transformador

Condición observada	Acción recomendada
El transformador tiene muchos años en operación y/o se encuentra en mal estado.	Practicar un mantenimiento general al transformador y en caso de presentar daños irreversibles sustituirlo por uno nuevo de bajas pérdidas.
El transformador presenta mucho ruido y/o se detectan manchas en sus boquillas (aceite) y alta temperatura.	Se le debe practicar mantenimiento general, así como pruebas de rigidez dieléctrica y en su caso rehabilitar su aceite; en caso de presentar daños mayores se deberá sustituir por uno nuevo.
El transformador presenta una alta temperatura, debido a falta de ventilación en el cuarto donde se encuentra instalado.	Mejorar la ventilación en el cuarto donde se encuentre el transformador, ya sea mediante la instalación de extractores, o abriendo ventanas para ventilación del local.
El transformador presenta alta temperatura de operación, debido a las altas temperaturas ambientes.	Instalar un sistema de ventilación forzada al transformador.

Nota: Para los casos en que se presenten pérdidas por incremento de temperatura y se tengan que instalar dispositivos de enfriamiento (ventiladores), se deberá de realizar el análisis correspondiente contra costos energéticos adicionales por estos equipos. Asimismo, se recomienda revisar la factibilidad de cambios de ubicación o aperturas naturales de ventilación (en techo para que salga el aire caliente, instalación de radiadores) para evitar estos gastos.

4.2.3 Medidas que reducen el costo energético

Este tipo de medidas, aunque no representan una reducción en el consumo energético, tienen una importancia fundamental en cualquier proyecto de eficiencia energética, ya que sus aportaciones a la reducción del costo y por ende a la viabilidad del proyecto en su conjunto son vitales.

Entre las medidas más comunes en este rubro tenemos las siguientes:

- a) Selección de la tarifa eléctrica óptima para las instalaciones de agua.
- b) Control de demanda en hora punta (Ésta es aplicable a servicios contratados en tarifas horarias).

En el Anexo D se presenta una descripción a detalle de la estructura tarifaria aplicable en México.

4.2.3.1 Selección de la estructura tarifaria

Un área de oportunidad de ahorro siempre atractiva en los sistemas de bombeo, consiste en cambiar la tarifa contratada con la compañía suministradora de energía eléctrica, por alguna otra que resulte más rentable.

Las tarifas de energía eléctrica comprenden las disposiciones específicas que contienen las cuotas y condiciones que rigen para los suministros de energía eléctrica agrupados en cada clase de servicio. Para esto, se recomienda conocer las tarifas existentes visitando la página electrónica de Comisión Federal de Electricidad (<http://www.cfe.gob.mx>), específicamente en la sección "Información al Cliente, Conoce tu Tarifa".

Las tarifas usualmente aplicables a Organismos Operadores de Sistemas de Agua Potable y Saneamiento son las siguientes:

Tarifa 6.-	Específica para los sistemas de agua
Tarifa OM.-	Ordinaria en Media Tensión
Tarifa HM.-	Horaria en Media Tensión
Tarifas de cargo fijo.-	Que aplica a tarifas en media tensión y entra vigor a partir de Enero de 2009

Para facilitar el análisis y procesamiento de la información de tarifas es conveniente el uso de formatos, los cuales se presentan en el Anexo D.

El proyecto de optimización tarifaria, se compone de dos etapas:

Etapas 1. Identificar las tarifas en que se encuentran todos y cada uno de los servicios del organismo operador, así como sus capacidades instantáneas y consumos. Con esta información se inicia el análisis de las tarifas contratadas.

Etapas 2. Comprende la evaluación de las posibilidades de ahorro en el costo de energía eléctrica con las diferentes tarifas aplicables de acuerdo a los siguientes criterios:

• **Sistemas conectados en baja tensión:**

En sistemas de bombeo con suministro en baja tensión, analizar las siguientes alternativas:

- a. Si está contratado en tarifa 2 ó 3, evaluar el cambiar a tarifa 6, o considerar la instalación de un transformador y cambiarse a tarifa OM.
- b. Si está contratado en tarifa 6, evaluar la instalación de un transformador y cambiarse a tarifa OM ó HM (tarifas en media tensión).

• **Sistemas conectados en media tensión:**

En sistemas de bombeo con suministro en media tensión, analizar las siguientes alternativas:

- a. Si la demanda es menor a 100 kW, evaluar entre las tarifas 6, OM, y HM cual resultaría más económica y si no se está contratado en la más económica de las tres, solicitar la incorporación a esta tarifa.
- b. Si la demanda es mayor a 100 kW, evaluar entre las tarifas 6 y HM la que resulte más económica y si no se está contratado en la más económica, solicitar la incorporación a esta tarifa.
- c. Si la demanda es mayor a 1000 kW, considerar la instalación de una subestación en alta tensión, verificar con la compañía suministradora la disponibilidad de suministro a ese voltaje, y en caso de haber disponibilidad, calcular los ahorros a lograrse con la incorporación a la tarifa en alta tensión y realizar la evaluación económica de realizar la inversión en la subestación. Este es un caso muy especial, debido a que se tendrá que considerar un cambio de subestación del usuario así como todos los dispositivos de control y protección necesarios.

• **Sistemas conectados en alta tensión:**

En sistemas de bombeo con suministro en alta tensión, analizar el tipo de suministro y si está en nivel subtransmisión, evaluar entre las tarifas 6, HS, y HSL, cuál resultaría más económica y si no se está contratado en la más económica de las tres, solicitar la incorporación a esta tarifa.

4.2.3.2 Control de la demanda en hora punta

En instalaciones en donde el suministro de energía eléctrica esté contratado en tarifa horaria (HM), se recomienda analizar las alternativas para la implantación de un sistema de control de la demanda, en combinación con el proyecto de eficiencia hidráulica descrito en la sección tres de este Manual, con el fin de que esta medida se haga viable.

Esencialmente, de lo que se trata es de disminuir la carga hidráulica en operación durante el horario de punta, para bajar con ello el monto de la demanda facturable, y como consecuencia, el importe que por ese concepto se paga a la compañía suministradora.

El control de la demanda podrá realizarse por cualquiera de los siguientes métodos:

- Modificación de los procedimientos de operación para disminuir carga en el horario de punta.
- Instalación de temporizadores para parar equipos antes del inicio del horario de punta y ponerlos en operación al término de dicho horario.
- Implantación de un sistema de control automático, que pare equipos como función de la demanda, y los ponga en operación como función de algún parámetro del proceso, tal como presión o nivel.

Los pasos a seguir para el cálculo de beneficios económicos dentro del desarrollo del proyecto son los siguientes:

Paso 1. Calcular la demanda facturable promedio actual, así como los consumos de energía promedio en punta, intermedio y base.

Paso 2. Determinar las condiciones hidráulicas que se tendrán para parar en horario de punta, así como la que se tendrán que implementar fuera del horario de punta y la demanda facturable.

Proponer una nueva forma de operación de los equipos, de manera tal que la carga en horario de punta sea la menor posible. Para ello, apoyarse con la capacidad de regulación de los tanques.

Como resultado de este análisis calcular la carga que estará operando en cada uno de los horarios, así como el número de horas de operación al mes, de manera que se pueda calcular la energía que se consumirá en cada uno de los horarios.

Energía (kWh)			Demanda Máxima (kW)		
Punta	Intermedio	Base	Punta	Intermedio	Base
EE' _p	EE' _i	EE' _b	DEM' _p	DEM' _i	DEM' _b

Paso 3. Determinar los ahorros a obtener con la medida.

- Calcular el importe de la facturación actual.
- Calcular el importe de la facturación esperado.
- Calcular los ahorros económicos a lograrse.

En caso de que las medidas a implantarse requieran inversiones, realizar la evaluación económica del proyecto de inversión, siguiendo la metodología descrita en el apartado 4.2.3.

4.2.3.3 Evaluación económica de las medidas de ahorro de energía y reducción de costos

Para todas las medidas de ahorro de energía evaluadas y de reducción de costos, se debe calcular el costo-beneficio de la inversión a realizar si es el caso; un método sencillo que se propone es el siguiente:

- Calcular el periodo simple de recuperación de la inversión con la ecuación 4.33.

$$Per_{ri} = \frac{Inv_{mae}}{A\$_{eco}} \tag{4.33}$$

Donde:

Per_{ri} = Periodo de recuperación de la inversión (años)

Inv_{mae} =Monto de la inversión necesaria para la aplicación de la medida de ahorro propuesta (\$)

A\$_{eco} = Ahorro económico anual que se obtendrá con la implantación de la medida de ahorro propuesta (\$/año)

4.2.4 Elaboración del reporte final del proyecto de eficiencia energética

El paso final para conformar un proyecto de eficiencia energética es preparar un reporte que contenga las observaciones y conclusiones del DEE y del PEE, haciendo

énfasis en las oportunidades de ahorro de energía, y el plan de acción para implantarlas, conteniendo las bases y los pasos seguidos en el análisis. Un buen reporte deberá contener la información que se detalla a continuación:

a. Resumen ejecutivo:

El propósito del resumen es el de permitir a la alta gerencia del organismo operador, el obtener en forma breve todos los resultados importantes, y entender de inmediato los resultados del diagnóstico, así como los costos y beneficios de las recomendaciones. Este resumen no deberá de sobrepasar cuatro cuartillas.

Esta sección debe incluir una tabla resumen de ahorros de energía globales distinguiendo las medidas convencionales o de rápida implementación, descritas en la tabla 4.7 y las medidas resultantes de la operación hidráulica descritas en la sección 4.2.5.1.

Los principales datos a integrar en dicha tabla resumen son los siguientes:

- Ahorros de energía y facturación anuales para cada medida de ahorro que resulta de la sumatoria de ahorros tanto energéticos como económicos de todos los equipos o sistemas de bombeo donde aplica cada medida.
- Porcentaje de ahorro por medida. Se calcula dividiendo el ahorro por cada medida entre el consumo y costo energético anual actual.
- Costo de inversión total para cada medida.
- Rentabilidad de las inversiones a realizar al menos por el método de tiempo simple de retorno de la inversión; esto es dividiendo el valor de la inversión entre el ahorro económico anual.
- Los totales de ahorro de energía, económicos y sus porcentajes sirven también para distinguir el ahorro adicional al logrado con medidas convencionales como las descritas en la tabla 4.7 con las medidas resultantes de la operación hidráulica descritas más adelante en la secciones 4.2.5.1 y cinco.

b. Descripción de las instalaciones evaluadas:

En esta parte se da a conocer la situación de las instalaciones del organismo operador en el momento en que se realizó el diagnóstico. Éste deberá contener un resumen con datos básicos de las instalaciones y contendrá:

- Datos generales de las instalaciones electromecánicas (equipos y condiciones)
- Descripción general del sistema de producción y distribución de agua potable y saneamiento (captaciones y distribuciones (pozo a tanque, pozo a red, combinada, gastos extraídos, etc.))

c. Análisis de consumos energéticos:

En este capítulo se presentan los datos recopilados y analizados con referencia al consumo energético en las instalaciones. La descripción de la situación energética deberá de venir acompañada por graficas para fácil comprensión como las siguientes:

- Consumos energéticos anuales; incluyendo demanda eléctrica máxima de todas las instalaciones y servicios contratados por el organismo.
- Tarifas eléctricas aplicables.
- Balance energético global del organismo operador.
- Variaciones mensuales de consumo de energía y producción (costos).
- Presentación de indicadores que sean aplicables partiendo de los resultados generados del análisis y gráficas obtenidas.

d. Recomendaciones y medidas de ahorro:

Se describirá el estado de las instalaciones y la problemática encontrada en la propia instalación y el mantenimiento de la misma.

- La primera parte de este apartado describirá la situación encontrada en los sistemas electromecánicos del organismo y las observaciones del equipo auditor. Se presentará una apreciación general del estado de las instalaciones.
- En la segunda parte se presentarán las oportunidades de ahorro. Cada una de las cuales deberá venir con los siguientes incisos:
 - Recomendación: Descripciones claras y concisas de las acciones a tomar para poder lograr los ahorros esperados.
 - Estimación de Ahorro: Presentación de las suposiciones y los cálculos que se hicieron para llegar al ahorro estimado de la recomendación.
 - Estimación de Inversión: Explicación de las suposiciones y los cálculos que se hicieron para

llegar a la inversión requerida para realizar la recomendación.

- **Análisis Financiero:** Explicación donde se determine la rentabilidad económica del proyecto. Como mínimo por el método del Período de Recuperación de la Inversión y de ser necesario, usando los métodos del Valor Presente Neto y la Tasa Interna de Retorno.

4.2.5 Medidas de ahorro de energía complementarias

Además de las medidas de ahorro de energía determinadas en las secciones anteriores, existen otro tipo de medidas de ahorro, que resultan una vez realizadas las acciones recomendadas en los proyectos de eficiencia física e hidráulica. Estas se indican a continuación.

4.2.5.1 Medidas resultantes de la optimización de la operación hidráulica

El resumen de medidas de ahorro de operación hidráulica, se presentan en la tabla 4.12 y en la sección 5, describen cada una y se explica el método para determinarlas y evaluarlas.

4.2.5.2 Medidas resultantes del ahorro de agua y optimización de procesos del lado de la demanda y el saneamiento

Estas medidas se indican en la tabla 4.13; sin embargo, no se describen a detalle debido a que no forman parte del alcance de este Manual.

Tabla 4.12 Medidas de ahorro de energía resultantes de la optimización hidráulica

Aspecto	Medida genérica	Medida específica
Optimización integral de la operación hidráulica	Redistribución volumétrica equilibrada • Macro Sectorización	Operar solamente las bombas y las horas estrictamente necesarias
	Programa de recuperación de caudales	Reducir al mínimo el caudal requerido y por ende la potencia de bombeo
	Control de presión y gasto en la redes • Variadores de frecuencia • Válvulas hidráulicas autocontroladas	Operar fuera de hora punta sin afectar la continuidad del servicio Uso óptimo de variadores de frecuencia Optimizar la eficiencia electromecánica sin arrastrar ineficiencias en la carga actual

Tabla 4.13 Medidas de ahorro de energía por ahorro de agua del lado de la demanda y saneamiento

Aspecto	Medida genérica	Medida específica
Sistemas de Saneamiento y Consumo Final	Medidas de ahorro en los sistemas de saneamiento municipales y privados	Tecnologías de bajo consumo en plantas de tratamiento de aguas residuales Reciclaje de agua tratada Generación de energía con el biogás generado en digestores anaerobios en caso de ser rentable
	Administración de la demanda final Ahorro de agua y su consecuente ahorro de energía en los sistemas de bombeo	Utilización de accesorios ahorradores de agua domésticos y comerciales Captación y reciclaje de agua de lluvia

Sección 5 Proyectos de eficiencia integral

En esta sección se expondrá la relación que existe entre el consumo y los costos de energía eléctrica, el deterioro de los equipos de bombeo, las tarifas eléctricas, la ocurrencia de fugas en las tuberías de la red, el envejecimiento de las conducciones y la inadecuada operación para distribuir el agua a los usuarios.

Asimismo, se muestra la estructura básica de un Proyecto de Eficiencia Integral (PEI), explicando los alcances, objetivos y metas, el proceso metodológico, las herramientas, y los resultados que proporcionan, con el fin de que el lector aprecie en forma global el contenido de dicho proyecto y visualice el contexto del presente Manual.

El Proyecto de Eficiencia Integral está enfocado al manejo combinado de las eficiencias física, hidráulica y energética, que fueron desarrollados en los capítulos anteriores. Las eficiencias aplicadas en este contexto potencializan los ahorros de agua y energía y el funcionamiento hidráulico de la red.

Como una opción, se describe una estrategia general recomendada para determinar un PEI y lograr ahorros de energía con acciones combinadas con la eficiencia física e hidráulica, y potenciar dichos ahorros de energía con las acciones de reducción de fugas y sectorización de la red de distribución.

Finalmente, se presenta un análisis de los casos de ciudades de nuestro país que han realizado un PEI y que actualmente están en proceso de implementación.

5.1 La evolución de los enfoques de eficiencia física, hidráulica y energética

Recordando las expresiones para determinar la potencia que demandará un equipo de bombeo y el costo anual que se paga por la operación del mismo tenemos:

$$P_{\text{bomba}} = \frac{9.81\rho Q_{\text{bomba}} H_t}{\eta_b} \quad (5.1)$$

Costo de Bombeo Anual = Costo (kw) x Potencia x # horas anuales

(5.2)

Donde:

ρ = Densidad del agua (kg/m^3)

Q_{bomba} = Gasto de la bomba (m^3/s)

H_t = Carga dinámica total (m)

η_b = Eficiencia entre la potencia entregada al fluido y la potencia del motor

Costo_{kw} = Costo del kilowatt-hora; en este caso la potencia está dada en kilowatt-hora

Partiendo de estas expresiones y de las condiciones de las instalaciones electromecánicas en los sistemas de agua, tenemos que cuando los equipos se desgastan por

un uso y por condiciones operativas inadecuadas, la eficiencia η_b disminuye y por tanto para considerar la mismas cantidades de gasto y carga, la potencia aumenta representando con ello un consumo de energía (kWh) mayor. En la figura 5.1 se muestra un equipo de bombeo con altas deficiencias en su operación (el desgaste de sus impulsores y el deterioro del cableado eléctrico y la falta mantenimiento posibilitan la disminución de la eficiencia del equipo).

Figura 5.1 Equipo de bombeo con eficiencia baja



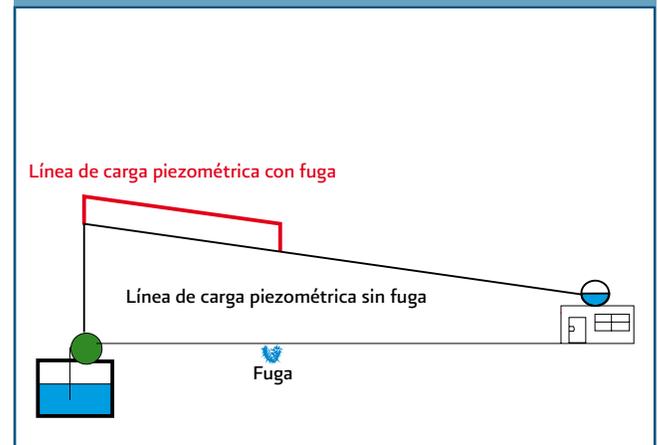
Adicionalmente, las tarifas contratadas por la venta de energía eléctrica y el número de horas anuales de operación de los equipos que se dispongan en los sistemas de agua, son factores determinantes en los costos que el organismo operador tiene que cubrir cada año.

Ahora partiendo de la carga total de bombeo (H_t) y el caudal a bombear (Q_b) tenemos que la carga dinámica (H_d) depende de cada sistema hidráulico y de las condiciones particulares, como la profundidad del acuífero, desniveles topográficos y capacidad de conducción de las tuberías, deterioro y envejecimiento de las mismas, así como de las condiciones cambiantes de nivel dinámico o presión de descarga (cuando se inyecta directamente a la red de distribución). Todo esto trae como consecuencia un incremento de carga en las bombas y consecuentemente la disminución del gasto bombeado, resultando con ello que existan desplazamientos en la curva de operación del equipo de bombeo a la zona de menor eficiencia y por ende se presenta un incremento de consumo de energía eléctrica respecto al de diseño.

Según estudios del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA (IMTA, 1999)¹⁴, se estima que existen en México alrededor de 150 000 kilómetros de tuberías de agua potable con edades superiores a los 30 años y está comprobado que estas tuberías aumentan significativamente sus coeficientes de cortante al flujo en esos años de servicio.

Aunado a lo anterior, si el diseño del sistema hidráulico es deficiente o si se presentan obstrucciones como válvulas parcialmente cerradas, aire atrapado, fugas en las tuberías, etc.; se tendrán enormes pérdidas de carga hidráulica con el consecuente incremento de la carga a vencer para que se pueda suministrar a los usuarios el agua requerida (figura 5.2).

Figura 5.2 Cada fuga en el sistema de distribución de agua provoca un aumento en la carga hidráulica del sistema de bombeo



Otro problema ligado a la carga de bombeo es la deficiente distribución de caudales y presiones provocado por la manipulación empírica de válvulas que realizan los operadores de los sistemas de agua, el cual obedece al crecimiento desordenado e irregular de la población y a la falta de herramientas técnicas para la toma de decisiones en la incorporación de nuevas colonias a la red de distribución de agua. Esta situación genera que el servicio se vuelva discontinuo o "tandeado", afectando a los usuarios en un abastecimiento poco confiable y de poca calidad, con el consecuente desgaste operativo y estructural del sistema hidráulico, y costos energéticos elevados (Figura 5.3).

¹⁴ IMTA, 1999, "Estudio de rehabilitación de tuberías en Saltillo, Coahuila", IMTA, México.

En México se estima que la continuidad del servicio de agua a los usuarios es del orden de 10 horas por día, aunque hay ciudades que pueden actualmente presumir de 24 horas.

Figura 5.3 Esquema de una red de distribución típica en México con servicio de agua discontinuo (las zonas coloreadas indican diferentes horarios de suministro a lo largo del día y de la semana)



El caudal bombeado (Q) incide también en el desperdicio de energía eléctrica. Si después de que el agua que es bombeada se pierde en las fugas o es derrochada por los usuarios (sobre todo los de cuota fija), entonces también la energía eléctrica utilizada para su bombeo es desperdiciada generando un mayor costo operativo para el organismo operador.

Las fugas incrementan la demanda de agua potable, lo que se refleja en un mayor caudal bombeado. Nadie utiliza el agua de las fugas, lo que significa una pérdida de dinero para el organismo operador y escasez para los pobladores de la localidad. Cabe comentar que en una sola fuga llegan a fluir caudales que van desde los 20 mililitros por segundo (ml/s) en tomas domiciliarias, y más de 250 ml/s en tuberías principales y cajas de válvulas (figura 5.4).

Figura 5.4 Fugas típicas de agua en redes de agua



De acuerdo con resultados de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2007)¹⁵, en México la ocurrencia de fugas en tomas domiciliarias y en tuberías de la red es del 27% en promedio, También, se ha determinado que en las redes de los sistemas de agua potable mexicanos se pierde del orden del 32% del caudal producido en las captaciones. Así que cada litro que se escapa por una fuga en el sistema de abastecimiento, equivale a perder el dinero que se necesita para producirla, o sea el costo de la energía eléctrica para bombearla y cloro que se le inyecta para desinfectarla.

5.2 Estructura del proyecto de eficiencia integral

Ante la realidad que se presenta en los sistemas de abastecimiento de agua en nuestro país, se plantea la necesidad de solucionar las deficiencias mencionadas en forma integral, revisando las instalaciones de distribución (líneas, tanques, etc.), instalaciones electromecánicas y las necesidades de abastecimiento a la población (dotación, etc.).

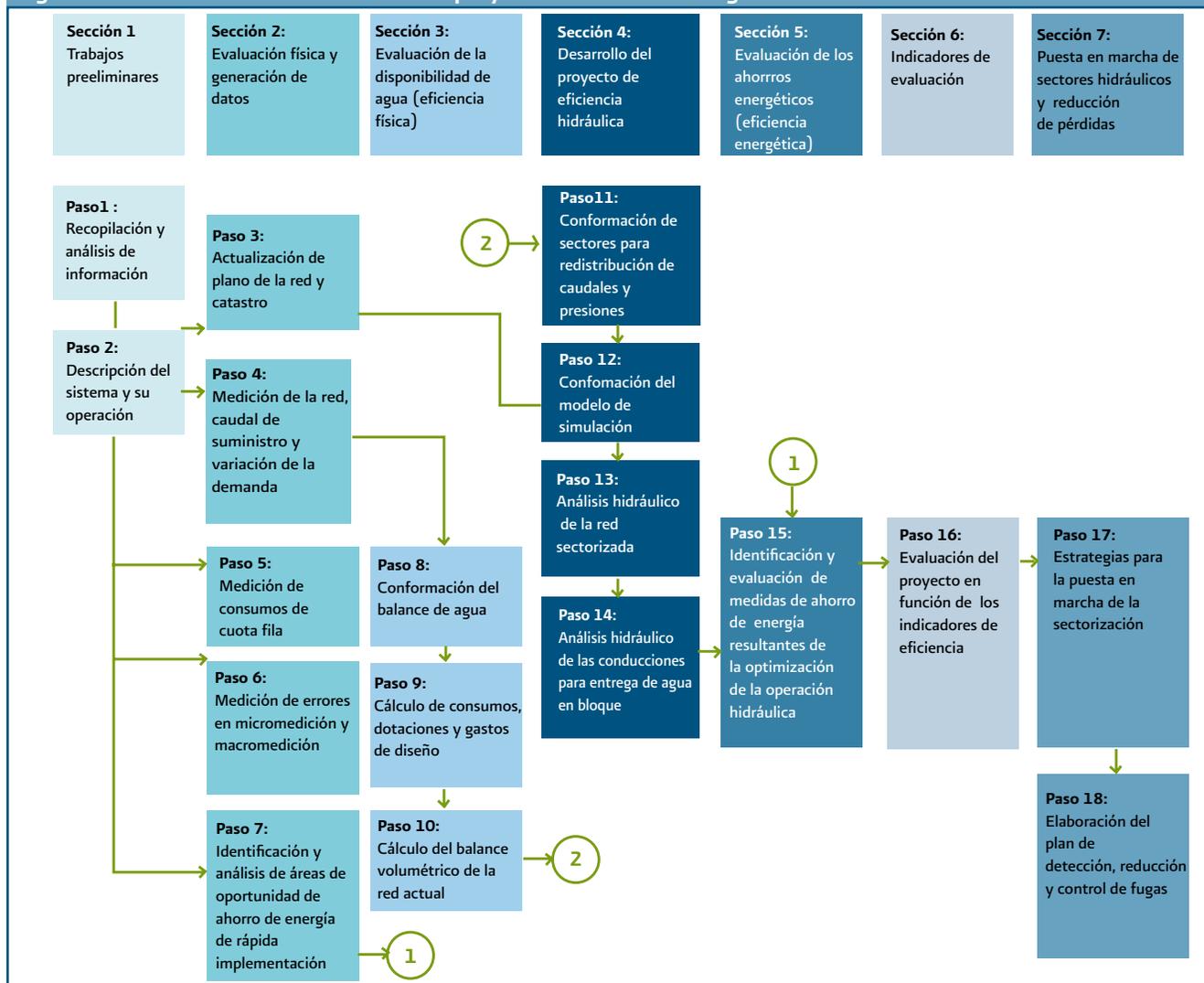
El procedimiento para elaborar e implementar estos proyectos de eficiencia se divide en 18 pasos, contenidos en las siete etapas siguientes:

- 1) Trabajos preliminares
- 2) Evaluación física y generación de datos
- 3) Evaluación de la disponibilidad de agua
- 4) Desarrollo del proyecto de eficiencia hidráulica
- 5) Elaboración del proyecto de eficiencia energética
- 6) Cálculo de indicadores de evaluación
- 7) Puesta en marcha de sectores hidráulicos y reducción de pérdidas de agua

Cada una de estas etapas está indicada en el esquema secuencial del procedimiento mostrado en la figura 5.5.

¹⁵ CONAGUA, 2007, "Sectorización de Redes de agua Potable", Subdirección General de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, México.

Figura 5.5 Secuencia de elaboración de un proyecto de eficiencia integral



A continuación se presenta una breve descripción de cada paso para dar a lector una visión generalizada del procedimiento a seguir para elaborar un proyecto de eficiencia integral.

5.2.1 Trabajos preliminares

En esta etapa del proyecto de eficiencia se recopila toda la información que tiene el organismo operador y se realiza una inspección del funcionamiento actual del sistema de agua potable (ver sección 1.1 del Manual).

En general se recopila información sobre el padrón de usuarios, planos de la red, equipos electromecánicos, estadísticas de producción, facturación, fugas y consumos de energía eléctrica.

En esta etapa se requiere entender el funcionamiento actual del sistema de agua potable porque es crucial para lograr un buen proyecto de eficiencia. Por tal, se requiere conocer a detalle su infraestructura, las características de las captaciones, conducciones, red de tuberías de distribución, tomas domiciliarias, equipos electromecánicos instalados (características y estado físico) y tanques de regulación. También, se debe explorar la situación de los sistemas de macro y micromedición, del control de fugas y de las tarifas vigentes de energía eléctrica.

Toda la información recopilada debe ser validada en campo y verificada por el organismo operador, aún cuando sea obtenida con otras instituciones u otras fuentes de información.

5.2.2 Evaluación física y generación de datos básicos

Es común encontrar en los sistemas de agua potable, falta de medidores en los puntos de suministro y consumo de agua, ausencia de planos de la red actualizados, falta de curvas características de los equipos de bombeo y datos estadísticos de fugas y errores de medición, entre otros. Por tal motivo, en este Manual se plantea una generación mínima de datos básicos, explotando al máximo las estadísticas, archivos y conocimientos del personal de los organismos de agua y realizando una campaña de mediciones de campo estratégicas, que complementen la información del organismo operador (Ver sección 1.2 del Manual).

Las campañas de medición y levantamiento en campo se enfocan en validar la información proporcionada por el organismo operador, en lugar de generar nueva información con extensas campañas de medición (comprobando exactitud).

En el caso del catastro de la red, se recurre a una combinación de campañas que incluyen entrevistas con el personal de operación del sistema, levantamiento del arreglo de fontanería (pozos, tanques, cruceros, etc.) e inspección de los mismos. Se ha encontrado que de esta manera se puede contar con catastros con un nivel de actualización, cobertura y confiabilidad cercanas al 90%, lo cual es considerado suficiente para la creación del modelo hidráulico y proponer el proyecto de eficiencia.

Además de las campañas de medición, se realiza el análisis de las características del sistema, población, cobertura, operación, zonas de influencia de tanques y fuentes de abastecimiento y horarios de tandeo.

Finalmente, se realiza también una exploración energética que consiste en evaluar los valores de los parámetros en la infraestructura electromecánica, sus condiciones de operación y mantenimiento, el consumo energético histórico, la evaluación de eficiencia, y la identificación de la forma de operar los sistemas de bombeo.

5.2.3. Evaluación de la disponibilidad de agua

Con base en la información estadística obtenida en las etapas anteriores y corregida con los resultados de las campañas de medición, se aplica el balance de agua, con el fin de estimar el nivel de fugas del sistema. En general,

este estudio se realiza para un periodo de un año histórico y de acuerdo con los estándares internacionales, adaptados a las condiciones de los sistemas de agua potable mexicanos (Ver sección 2.1. del Manual).

Al conocer el nivel de fugas, se puede entonces determinar la oportunidad de ahorro de agua, energía y calcular la disponibilidad de agua en el proyecto de eficiencia hidráulica.

Después de aplicar el balance de agua, se evalúa el valor de la dotación actual. La experiencia demuestra que en los sistemas de agua potable en nuestro país, las dotaciones en general son elevadas debido al alto porcentaje de fugas existente. Ante esta situación, en los proyectos de eficiencia hidráulica planteados en este Manual, se considera reducir las fugas a un nivel aceptable del 20%, como medida de conservación del agua de la región y ahorro de energía por bombeo.

Enseguida, se elabora un balance volumétrico en la red de distribución con el fin de evaluar el equilibrio que existe en cada zona de influencia hidráulica entre el gasto disponible en la misma y el consumo demandado por la población. Esta evaluación es la base para elaborar posteriormente el esquema de redistribución de caudales presiones de la red, o de sectorización, puesto que se identifican las áreas donde la población no tienen suficiente agua, aquellas a las que les sobra agua, la infraestructura desaprovechada y las capacidades de suministro, conducción y regularización del agua disponible, entre otras.

5.2.4 Desarrollo del proyecto de eficiencia hidráulica

Después de evaluar la distribución de caudales y presiones en la red actual, se efectúa el proyecto de eficiencia hidráulica basado en sectores de distribución en la red (Ver secciones 3.1 y 3.2 del Manual). El esquema de sectorización de redes tiene ventajas sobre las redes totalmente malladas, ya que facilita la asignación de volúmenes de agua a los usuarios, se optimiza el control de fugas, se mejora la operación, se dictaminan mejor las ampliaciones de la red y se logra mayor rentabilidad en el ahorro de agua y energía.

El procedimiento para elaborar el proyecto de eficiencia hidráulica consiste en hacer una redistribución equilibrada de volúmenes de agua en la red, en función de la demanda de los usuarios y considerando que se alcanza

la dotación de diseño. En este proceso se delimitan sectores hidráulicos, áreas de influencia de tanques y captaciones existentes y se establecen los requerimientos de infraestructura adicional mínima o aquella que saldrá de operación. Un equilibrio en esta redistribución de caudales o un balance positivo significa que cada sector será capaz de cubrir la demanda en cantidad y calidad de servicio a sus usuarios.

Después de definir el esquema de sectorización de la red, se construye un modelo de simulación hidráulica del abastecimiento y distribución del sistema de agua potable, este modelo deberá estar a escala, georeferenciado y contendrá todos los tramos de la red de tuberías, tanques, rebombos, pozos, conducciones y válvulas. Actualmente, existen simuladores hidráulicos de redes de agua comerciales, que pueden ser utilizados para esta etapa del proyecto; asimismo, con las herramientas del programa y las mediciones de campo, se deberá ajustar el modelo de la red actual, antes de proceder al diseño de sectores hidráulicos.

Con el modelo de simulación hidráulica se proyectan, etiquetan y cuantifican los cambios necesarios en la red para su funcionamiento óptimo. Las condiciones de operación y demanda de cada sector resultante de la redistribución de caudales son ingresadas y evaluadas en el modelo. Por un lado, se analizan las condiciones de velocidades y presiones permisibles en la red, y por otro se examinan las capacidades de las conducciones para la entrega de agua en bloque y de los tranques de regularización.

Finalmente, se plasma en planos dónde se señala la delimitación de sectores propuestos, los detalles de los cambios físicos (cortes, conexiones, instalación de válvulas, etc.) y los diseños de equipos de bombeo.

5.2.5 Elaboración del proyecto de eficiencia energética

El proyecto de eficiencia energética se realiza en dos partes, una que se deriva de acciones que aplican solamente del lado del suministro, denominadas de rápida implementación PEE (ver sección 4 del Manual), y aquellas medidas que consideran también el lado de la demanda, nombradas de mediano plazo (ver sección 5.3 del Manual).

El proyecto de eficiencia energética de rápida implementación (PEE), consiste en determinar los ahorros de energía, con las condiciones actuales de operación del sistema, es decir, sin corregir las deficiencias hidráulicas de la red, ni reducir los niveles de fugas existentes.

Como acciones de este tipo se considera: la adecuación y/o cambio de equipos de bombeo y de motores existentes (de preferencia de alta eficiencia), control de presiones mediante variadores de velocidad, utilización de capacitores y utilización de generadores diesel para sustituir suministro de energía en hora punta cuando la tarifa es HM; y en el caso para el pago ante CFE por menor precio por kWh consumido readecuación de tarifas eléctricas.

Por su parte, el proyecto de eficiencia energética de implementación en el mediano plazo, requiere del análisis conjunto con los resultados del proyecto hidráulico, debido a que las condiciones operativas (carga-gasto) cambiarán al redistribuir los caudales, presiones en la red y reducción de las fugas de agua.

Con base en los resultados del proyecto hidráulico relativo a la operación y redistribución de caudales, se analiza entonces la capacidad de cada sector para aplicar medidas de ahorro de energía, tales como sustitución de equipos de bombeo con las características finales de carga-gasto, la aplicación de variadores de velocidad en sistemas con inyección de agua potable directa a red, paro de equipos utilizando la capacidad de tanques de almacenamiento en hora punta (tarifa HM de CFE) y selección de equipos que pueden quedar en reserva o apagados según la zona de influencia.

Las características de carga, gasto y operación de los equipos de bombeo propuestos en el proyecto de eficiencia hidráulica son evaluadas también, para determinar la energía que demandarán así como el costo de la misma; estas características son comparadas con las estadísticas de consumo energético del año de estudio y el resultado de la comparación se considera como un potencial ahorro energético y de agua, derivado de la aplicación del proyecto de eficiencia hidráulica.

5.2.6 Cálculo de indicadores de evaluación

Los indicadores son medidas de la eficiencia y eficacia del sistema de agua potable. Aunque existen una gran cantidad de indicadores, en el escenario de la eficiencia física que nos ocupa se propone el seguimiento mínimo de los siguientes:

- Indicador Energético IE (KWh/m³)
- Indicador de Costo Unitario de Energía (CPE) (\$/kWh)
- Indicador de eficiencia física (IEF) (%)
- Dotación promedio por habitante (l/hab/día)
- Indicador de Continuidad en el servicio (ICS)

Es importante determinar estos indicadores permanentemente en los organismos operadores, y especialmente cuando se estén realizando acciones de incremento de eficiencia, puesto que a través de ellos se pueden evaluar el desarrollo del avance que se logra en el sistema de agua potable, y en consecuencia establecer las políticas y programas en este sentido.

La determinación de los indicadores anteriores se describe en el capítulo 6 de este Manual.

5.2.7 Puesta en marcha de los sectores hidráulicos y reducción de pérdidas de agua

Después de elaborado el proyecto de eficiencia integral, se procede a su implementación (ver secciones 2.2 y 3.2 del Manual). Este trabajo requiere de una estrategia técnica, logística y financiera para llevarlo a cabo. Por ello es necesario y efectivo elaborar un programa de ruta crítica de las acciones a implementar. Con base en este análisis es posible determinar las interrelaciones y/o afectaciones en los cambios operacionales del sistema de distribución de agua potable.

Los problemas comunes que surgen durante la puesta en marcha de sectores son: Cambios de presiones en la red, alteración temporal de la calidad del agua por cambio de trayectorias del flujo, suspensiones del servicio a los usuarios durante el proceso de construcción, retrasos imprevisibles, problemas de saturación de los sectores por la existencia de cisternas y tinacos en exceso, etc. pero todas estas acciones implementadas se traducen en una mejora del servicio a los usuarios, ahorros de agua y energéticos.

5.3 Medidas de ahorro de energía resultantes de la optimización de la operación hidráulica

Un programa de reducción de fugas, además de ahorrar agua, reduce las pérdidas de presión y da como resultado ahorros de energía, permite seleccionar con base a las nuevas condiciones de carga – gasto que se proyecten, adquirir bombas de mayor eficiencia y por tanto menor potencia. Asimismo, si se considera el ahorro por el agua no desperdiciada en las fugas, se contará con más agua disponible y con ello se tendrían otros beneficios económicos como el aplazamiento de inversiones para una nueva fuente de abastecimiento.

Las ineficiencias y defectos en la operación hidráulica también ocasionan excesivo consumo energético, algunos de estos problemas y sus consecuencias se describen en la tabla 5. 1

Tabla 5.1 Problemas operativos típicos y sus consecuencias en el consumo energético

Problema o defecto operativo	Consecuencia hidráulica	Consecuencia energética
Desbalance volumétrico en la asignación de caudales por zonas	Suministro por tandeo Mayores pérdidas de agua en redes por sobrepresiones y deterioro de la infraestructura	Mayor número de horas de operación de equipos de bombeo por agua suministrada Mayores pérdidas energéticas por variaciones de mayor presión en las tuberías
Falta de dispositivos de control de presión	Excesivas pérdidas de agua por elevadas presiones Mayores pérdidas de agua por fugas a presión	Gastos mayores de energía por mayor carga de bombeo, además de variaciones en el punto óptimo de eficiencia de equipos
Carencia de tanques de regulación y desaprovechamiento de los existentes	Mayores pérdidas de agua por fugas con presiones altas Mayor deterioro de la infraestructura por regulación de gastos por válvulas en las redes	Mayor potencia en sistemas de bombeo en periodos pico de demanda (puntos de operación fuera de máxima eficiencia)

Basado en estos conceptos, una etapa importante dentro de la metodología del proyecto de eficiencia integral, consiste en determinar y cuantificar adecuadamente los ahorros de energía resultantes de los cambios en la forma de operar el sistema de distribución (procesos descritos en la sección 3). Estas medidas de ahorro de energía resultan de reducir el nivel de pérdidas de agua en las redes y de definir una mejor distribución del agua producida.

Las principales medidas de ahorro que normalmente resultan de este análisis son:

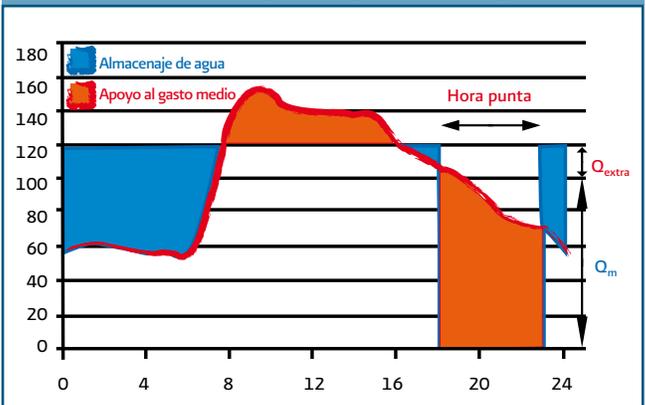
- Operación fuera de hora punta sin afectar la continuidad del servicio.
- Operación solamente de los sistemas de bombeo y número de horas estrictamente necesario.
- Aprovechamiento óptimo de variadores de frecuencia.
- Ahorro de energía por cambios en la carga y gasto originales al instalar equipos de bombeo operando a máxima eficiencia.

5.3.1 Operación fuera de hora punta de equipos de bombeo

Para evaluar la capacidad de los equipos de suspender el bombeo en horario de punta (tarifa HM de CFE), deberán de cumplir los siguientes requisitos:

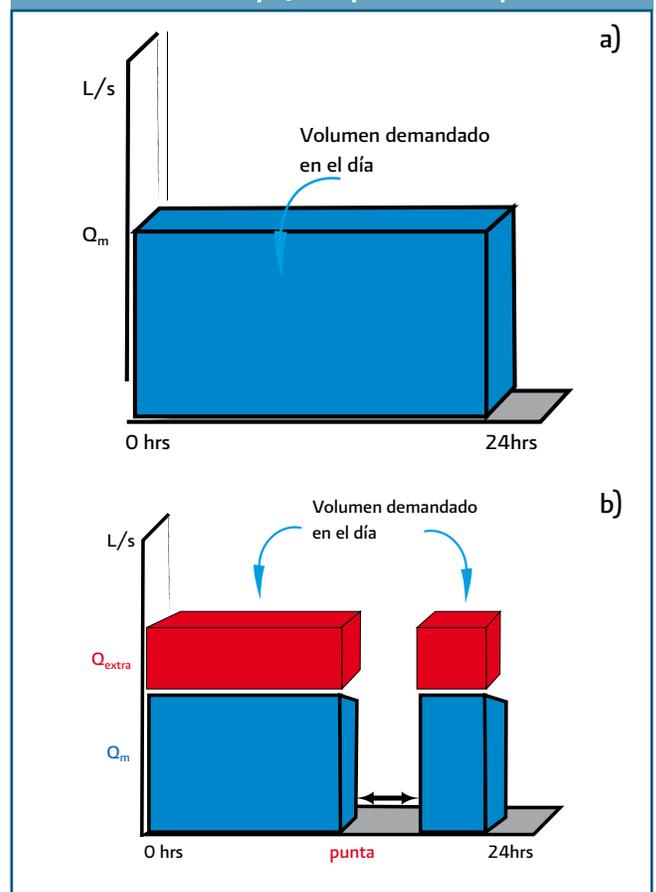
Antes de proyectar paros de equipos que impliquen una disminución del volumen diario disponible para la zona y que agravan el servicio discontinuo, se debe de pensar en cambios que permitan un incremento del caudal disponible en la zona hasta lograr el servicio continuo. Además, los equipos en cuestión deberán de abastecer al sector a través de un tanque regulador. El paro en hora punta se podrá realizar siempre y cuando se cuente con una reserva de agua en el tanque que cubra la demanda durante las horas punta (figura 5.6).

Figura 5.6 Comportamiento del volumen almacenado y demandado en un tanque con paro en hora punta



Cuando se realizan paros de equipos, el volumen de agua que dejan de suministrarse durante las horas de paro debe de ser cubierto durante horas base, de tal forma que el volumen de agua diario entregado a la población permanezca constante (figura 5.7).

Figura 5.7 Volumen demandado en un día, a) con suministro continuo y b) con paro en hora punta



El tanque regulador deberá de contar con capacidad suficiente. Se utilizará la metodología desarrollada en el inciso 3.2.1.3, para revisar que el tanque regulador tenga la capacidad suficiente para las condiciones de operación con el paro en hora punta.

El gasto extra (Q_{extra}) en horario base para compensar el paro en hora punta se podrá calcular de dos maneras:

- a. Horas de bombeo fijas y gasto por definir. Se utilizará la ecuación 5.3 para calcular el gasto extra a bombear durante las horas base.

$$Q_{extra} = \left(1 - \frac{24 \text{ horas}}{\text{horas base}} \right) * \text{gasto máximo diario}$$

(5.3)

- b. Gasto disponible fijo y horas de bombeo por definir. Cuando una fuente establecida, como un pozo disponible o en reserva se utilizará para cubrir el gasto extra, el horario de bombeo se definirá utilizando la ecuación 5.4 para definir el tiempo de bombeo.

$$hr_{bombeo} = \left(1 - \frac{Q_{disponible}}{Q_{extra}} \right) * hr_{base}$$

(5.4)

El gasto extra y las horas base se introducirán en porcentaje del gasto medio en la columna 2 de la tabla 5.2.

Tabla 5.2 Ejemplo del formato para el cálculo de capacidad de regulación requerida con paro en hora punta

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Horas	Suministro %	Demanda Horaria %	Diferencias	Acumulado %
0-1	120	61	59.00	39
1-2	120	62	58.00	77
2-3	120	60	60.00	117
3-4	120	57	63.00	160
4-5	120	57	63.00	203
5-6	120	56	64.00	247
6-7	120	78	42.00	269
7-8	120	138	-18.00	231
8-9	120	152	-32.00	179
9-10	120	155	-35.00	124
10-11	120	141	-21.00	83
11-12	120	138	-18.00	45
12-13	120	138	-18.00	7
13-14	120	137	-17.00	-30
14-15	120	136	-16.00	-66
15-16	120	141	-21.00	-107
16-17	120	114	6.00	-121
17-18	120	106	14.00	-127
18-19	-	102	-102.00	-129
19-20	-	91	-91.00	-120
20-21	-	79	-79.00	-99
21-22	-	73	-73.00	-72
22-23	120	71	49.00	-43
23-24	120	57	63.00	0
Total	2400	2400	---	---

Utilizando esta tabla de acumulados se aplicará la metodología del inciso 3.2.1.3. para calcular el volumen requerido de regulación, el cual deberá ser menor al volumen disponible del tanque regulador para que la aplicación del paro en hora punta sea válido.

Una vez definido el gasto extra en horario base y que se haya asegurado que el tanque regulador tiene la capacidad suficiente para cubrir la aplicación del paro en hora punta, se procede a calcular los ahorros de la siguiente manera:

Paso 1. A partir de la serie histórica de datos de facturación (los que estén contratados en tarifa HM), calcular la demanda facturable promedio actual así como los consumos de energía promedio en punta, intermedia y base de cada sistema de bombeo analizado. Se puede utilizar el formato mostrado en la tabla 5.3.

Paso 2. Determinar la carga que se podrá parar en horario de punta, así como la que se tendrá que incrementar fuera del horario de punta y la demanda facturable.

Primero se determina de los datos del formato resultante de la determinación final de medidas de ahorro resultantes de la operación hidráulica, tomando los datos de carga y gasto del equipo que se controlará en hora punta calculada de acuerdo a la ecuación 5.6.

$$P_{ep} = g * \frac{Q_p * H_p}{\eta_p} \quad (5.6)$$

Tabla 5.3 Formato para el cálculo de la demanda facturable promedio actual

Equipo	Consumo de Energía actual (kWh)			Demanda Máxima actual (kW)		
	Punta	Intermedia	Base	Punta	Intermedia	Base
1						
2						
..						
..						
Promedio	EE _p	EE _i	EE _b	DEM _p	DEM _i	DEM _b

Calcular la demanda facturable promedio actual como:

$$DF = DEM_p + FRI * (\text{máx}(DEM_i - DEM_p), 0) + FRB * (\text{máx}(DEM_b - DEM_{p,i}), 0) \quad (5.5)$$

Donde:

- DF = Demanda facturable promedio actual
- DEM_p = Demanda máxima en punta promedio
- DEM_i = Demanda máxima en intermedio promedio
- DEM_b = Demanda máxima en base promedio
- DEM_{p,i} = Demanda máxima en punta e intermedio promedio
- FRI = Factor de reducción en horario intermedio aplicable a la región tarifaria donde se encuentre el servicio
- FRB = Factor de reducción en horario de base, aplicable a la región tarifaria donde se encuentre el servicio

Donde:

- P_{ep} = Potencia eléctrica del sistema de bombeo propuesto a parar en hora punta (kW)
- Q_p = Gasto especificado para el sistema de bombeo propuesto a parar en hora punta (m³/s)
- H_p = Carga dinámica total para el sistema de bombeo propuesto a parar en hora punta (m)
- g = Gravedad 9.81 m/s²
- η_p = Eficiencia electromecánica para el sistema de bombeo propuesto a parar en hora punta

Esta será la potencia que se reducirá en hora punta, y el ahorro en potencia se calcula con la diferencia entre la potencia actual y la que se reducirá en hora punta con la ecuación 5.7.

$$\Delta P_{hp} = DP_{pa} - P_{ep} \quad (5.7)$$

Donde:

ΔP_{hp} = Potencia eléctrica a ahorrar en hora punta (kW)

DP_{pa} = Demanda de Potencia en hora punta actual (kW)

P_{ep} = Potencia eléctrica del sistema de bombeo propuesto a parar en hora punta (kW)

Cabe mencionar que en caso de poder parar todo el periodo en hora punta, el factor P_{ep} se convierte en cero por lo que el ahorro en potencia punta será equivalente a la demanda máxima en hora punta actual.

Paso 3. Cálculo de la demanda facturable y consumo a ahorrar en hora punta. Una vez calculada la potencia propuesta a reducir en hora punta, se calcula la reducción en demanda facturable con la ecuación 5.8.

$$DF_{fe} = (DF_{fa} - \Delta P_{hp}) * FRI \quad (5.8)$$

Donde:

DF_{fe} = Demanda facturable esperada (kW)

DF_{fa} = Demanda facturable actual (kW)

FRI = Factor de reducción en horario intermedio aplicable en la región tarifaria donde se encuentre el servicio

ΔP_{hp} = Potencia eléctrica a ahorrar en hora punta (kW)

La energía consumida en punta esperada E_{pe} (kWh) se calcula con la ecuación 5.9.

$$EE_{pe} = EE_{pa} - (\Delta P_{hp} * hr_{tp}) \quad (5.9)$$

Donde:

EE_{pe} = Energía consumida en punta esperada (kWh/año)

EE_{pa} = Energía consumida en punta actual (kWh/año)

hr_{tp} = Horas de duración del horario punta anuales según la región (Horas punta/año)

ΔP_{hp} = Es la potencia eléctrica a ahorrar en hora punta (kW)

Paso 4. Determinar los ahorros económicos a obtener con la medida.

Calcular el importe de la facturación esperada en hora punta, ecuación 5.10.

$$\$Fe = (DF_{fe} - DF_{fa}) * CDF + (EE_{pa} - EE_{pe}) * CEP \quad (5.10)$$

Donde:

$\$Fe$ = Importe de la facturación actual esperada con la nueva hora punta

DF_{fe} = Demanda facturable esperada calculada en el paso anterior (kW)

DF_{fa} = Demanda facturable actual (kW)

CDF = Costo unitario de la demanda facturable según la región tarifaria

EE_{pe} = Energía consumida en punta esperada. (kWh/año)

EE_{pa} = Energía consumida en punta actual (kWh/año)

CEP = Costo unitario de la energía de punta según la región tarifaria

5.3.2 Cambio de condiciones de carga y gasto en equipos existentes

Esta medida de ahorro de energía eléctrica se calcula por cambio en las condiciones de operación de los equipos de bombeo respecto a las actuales antes del proyecto y las propuestas finales. Estos ahorros pueden ser positivos pero también pueden ser negativos en caso de que dichas condiciones propuestas incrementen las cargas y/o gastos de operación.

El procedimiento de cálculo se presenta a continuación:

Paso 1. Se definen los sectores y sistemas de bombeo que tendrán cambios y se especifican las condiciones de operación actuales, se sugiere utilizar el formato de la tabla 5.4.

Tabla 5.4 Formato para especificar equipos que tendrán cambios en la carga y el gasto de operación

Identificación de las zonas y equipos de bombeo				Descripción de la operación y sus cambios		Condición actual			
Identificación del sector proyecto (1)	Operación del sector (2)	Sistema de bombeo	No. Equipo	Operación actual (3)	Operación propuesta (4)	Horas anuales de operación actuales (5)	Gasto (m ³ /s) (6)	Carga (mca) (7)	
SH-1	Centro regulado	a	1	Se describe como opera actualmente cada sector	Se describe como se propone operar cada sector en la nueva opción de optimización hidráulica	H _{aoa}	Q _a	H _a	
			2						
	Centro directo		b			1			
			c			1			
SH-2 SH-N		d	1						
		e	1						
		f	1						
		g	1						
SH-n		n	1						

La explicación del procedimiento se presenta a continuación:

- (1) Se registra el sector hidráulico donde se propone operar el equipo que sufrirá cambios en sus condiciones de operación.
- (2) Se especifica el tipo de operación de cada sector que puede ser regulada o suministro directo a red.
- (3) Se especifica la forma de operar actualmente de los sectores donde se encuentren los equipos que sufrirán cambios.

- (4) Se especifica la forma propuesta de operar dichos sectores y los equipos de bombeo involucrados.
- (5) Se registra el número actual de horas anuales de operación.
- (6 y 7) Se indican las condiciones de gasto y carga actuales de los equipos de bombeo con que operan.

Paso 2. Se especifican las condiciones de operación propuestas y se calculan las diferencias en base al consumo y costo energético, se sugiere utilizar la tabla 5.5.

Tabla 5.5 Formato para el cálculo de ahorros energéticos por cambio en condiciones de operación

Identificación de las zonas y equipos de bombeo				Condición propuesta				Variación en el consumo y facturación energética			
"Identificación del sector proyecto (1)"	Operación del sector (2)	Sistema de bombeo	No. equipo	Gasto propuesto (L/s) (8)	Carga propuesta (mca) (9)	Horas anuales de operación (10)	Eficiencia electromecánica propuesta (11)	Ahorro en potencia eléctrica ΔPec (kW) (12)	Ahorro en Consumo de energía Δ\$Cec. (kWh/año) (13)	Ahorro en facturación energética ΔFEc (\$/año) (14)	
SH-1	Centro regulado	a	1	Q _p	H _p	H _{aop}	η _{em}	$\Delta P_{ec}; \Delta P_{ec1} = (Q_{p1} * H_{p1} - Q_{a1} * H_{a1}) * 9.81 / EE_{p1}$	$\Delta \$C_{ec}; \Delta C_{ec1} = \Delta P_{ec} * h_{aop}$	$\Delta FE_{c1}; \Delta FE_c = \Delta EE_1 * CUE$	
			2								
	Centro directo		b	1							
			c	1							
SH-2 SH-N		d	1								
		e	1								
		f	1								
		g	1								
SH-n		n	1								

La explicación del procedimiento en esta parte del formato se presenta a continuación:

- (8 y 9) Se especifican las condiciones de Caudal (Q_p) y Carga (H_p) propuestas.
- (10) Se especifican las horas anuales de operación que tendrá el equipo de bombeo h_{raop} .
- (11) Se especifica la eficiencia electromecánica para el nuevo equipo propuesto η_{em} .
- (12) Se calcula el ahorro (o variación) en potencia eléctrica por cambios en condiciones de operación con la ecuación 5.11.

$$\Delta Pec = (Q_p * H_p - Q_a * H_a) * 9.81 / \eta_{em} \quad (5.11)$$

- (13) Se calcula el ahorro por consumo energético anual por cambios, $A\$Cec$ con la ecuación 5.12.

$$A\$Cec = \Delta Pec * h_{raop} \quad (\text{kWh/año}) \quad (5.12)$$

- (15) Se calcula el ahorro en facturación energética por cambios, ΔFEc con la fórmula:

Por equipo :

$$\Delta FEc = EE_{eq} * CUE \quad (5.13)$$

Donde:

- ΔFEc = Facturación eléctrica ahorrada por equipo (\$/año)
- EE_{eq} = Energía eléctrica ahorrada (por equipo) (kWh/año)
- CUE = Indicador de costo energético unitario específico para el sistema en estudio (\$/kWh)

Sumando el total de equipos que cambian sus condiciones y reducen su tiempo de operación :

$$\Delta FE_t = \sum_1^{n_x} (\Delta FE_1 + \dots + \Delta FE_n) \quad (5.14)$$

Donde:

- ΔFE_t = Facturación eléctrica ahorrada total con todos los equipos donde aplica esta medida (kWh/año)
- ΔFE_1 = Facturación eléctrica ahorrada en el equipo 1 (kWh/año)
- ΔFE_n = Facturación eléctrica ahorrada en el equipo n (kWh/año)
- n_x = Número total de equipos donde aplica esta medida

5.3.3 Aplicación de velocidad variable en equipos que inyectan directo a la red

Cuando la solución hidráulica para suministrar agua a una determinada zona, no implica el suministro a través de un tanque regulador: por no existir dicho tanque, por no poder modificar la infraestructura de conducciones o por no convenir a la mejor forma de operación para dicha zona; y se tienen que suministrar agua directamente a la red, se pueden utilizar las herramientas generadas que se explican en la sección 3 del Manual, fundamentalmente el modelo de simulación hidráulica de la red, para evaluar y determinar los parámetros de operación para la aplicación de variadores de velocidad.

Esta medida, puede o no coincidir con los sistemas que ya se identificaron en los proyectos de ahorro de rápida implementación en la sección 4.1.6; sin embargo, el cálculo de ahorros potenciales es diferente al explicado en esa sección para sistemas de bombeo en operación actual dado que en este caso, se trata de una situación operacional hipotética optimizada.

El cálculo en este caso se realiza de la forma siguiente:

Paso 1. Se identifican los sectores que operan con suministro directo a red y donde es viable un variador de velocidad y se especifican las condiciones de operación carga y gasto máximos, así como la presión de control constante validada por el modelo de simulación hidráulica (setpoint). El formato a usar es el que se muestra en la tabla 5.6.

Tabla 5.6 Formato para identificar sectores de operación donde es viable el variador de velocidad

Identificación				Análisis hidráulico			
"Sector Proyecto"	Sub Sector	Pozo		Gasto máx propuesto (L/s)	Carga a gasto máx (mca)	Setpoint carga (mca)	Operación
		Identificación	Núm				
							Directo a red SH-6a con variador de carga constante
							Directo a red SH-6b con variador de carga constante
							Directo a red SH-6c con variador de carga constante
							Directo a red SH-6d con variador de carga constante

Paso 2. Se estiman los valores y tiempos de operación a gasto medio de la forma siguiente:

El gasto máximo (Q_{max}) es el propuesto
 El gasto medio (Q_{med}) y mínimo (Q_{min}) se calcula con los factores de variación máxima horaria y diaria en función del gasto máximo.

- $Q_{med} = Q_{max} / 2.17$ (lps)
- $Q_{min} = Q_{max} / 3.86$ (lps)

Los tiempos de operación se estiman con base en la curva de demanda sugeridos por la CONAGUA y descrita en la sección 1.2.3.

- Horas al día en Q_{max} = 8 horas
- Horas al día en Q_{med} = 5 horas
- Horas al día en Q_{min} = 11 horas

El formato a usar con los valores indicados en un ejemplo es el mostrado en la tabla 5.7.

Paso 3. Se calcula el consumo de energía anual operando sin variador de velocidad.

Las cargas estimadas de operación para cada Q (max, med y mín) y sus respectivas eficiencias electromecánicas se estiman de acuerdo al comportamiento de una curva de operación típica

La potencia eléctrica P_e (kW) para cada periodo, se calcula con el gasto, carga y eficiencia electromecánica, mediante la ecuación 5.15.

$$P_e = \frac{Q * H * 9.81}{\eta_{em}} \tag{5.15}$$

Donde.

- P_e = Potencia eléctrica que se demandará en el periodo (kW)
- Q = Gasto esperado para el periodo (m^3/s)
- H = Carga hidráulica de bombeo para el gasto esperado del periodo (m.c.a.)
- η_{em} = Eficiencia electromecánica en el punto de operación del periodo

Tabla 5.7 Formato de requerimientos de sectores

Identificación				Análisis hidráulico			Requerimientos					
"Sector proyecto"	Sector	Pozo		Gasto máx propuesto (L/s)	Carga a gasto máx (mca)	Setpoint carga (mca)	Q requerido (L/s)			Operación (h/día)		
		Identificación	Núm				Min.	Medio	Máx.	Min.	Med.	Máx.
SH-6b	N3	Factor I	56	27.0	125.0	130.0	7.0	12.4	27.0	11	5	8
		Factor II	57	12.0	125.0	130.0	3.1	5.5	12.0	11	5	8

La energía anual consumida por periodo (kWh/año) se calcula como el producto de la potencia eléctrica que se demandará en el periodo, multiplicada por el número de horas de operación al día del periodo correspondiente, y por el número de días de operación al año, utilizando la ecuación 5.16.

$$EE = P_e \cdot \# \text{horas} \cdot \# \text{días/año} \quad (5.16)$$

Donde:

EE = Energía que se consumirá en el periodo correspondiente (kWh/día)

P_e = Potencia eléctrica que se demandará en el periodo (kW)

#horas = Número de horas que operará el equipo en dicho periodo

#días/año = Número de días al año que opera el equipo

A manera de ejemplo, en la tabla 5.8 se presenta el cálculo de la energía anual consumida en cada uno de los periodos (punta, medio y base), en la que se indica, siguiendo la metodología, los datos de caudal, carga, eficiencia electromecánica, número de horas de operación al día, potencia eléctrica estimada y energía eléctrica consumida por periodo.

Finalmente, la energía total anual consumida por el equipo se calcula como la suma de la energía consumida al año en cada uno de los periodos, como se ilustra a continuación:

Energía Anual Consumida sin variador = Energía consumida en periodo punta + Energía consumida en periodo intermedio + Energía consumida en periodo valle = 155 181 kWh/año + 73 249 kWh/año + 133 252 kWh/año = 361 682 kWh/año

Paso 4. Se calcula el consumo de energía anual operando con variador de velocidad y los ahorros de energía resultantes.

La Potencia eléctrica P_e (kW) y la energía anual consumida EE (kWh/año) para cada periodo, se calcula con el gasto y la eficiencia determinados pero con una carga constante definida con el setpoint de presión validado con el modelo de simulación hidráulica. Este análisis es confiable y presenta ahorros energéticos muy buenos, pero para asegurar su validez es conveniente la revisión de las curvas de operación de las bombas y su eficiencia correspondiente, puesto que al variar la velocidad (disminuirla), la curva de operación del equipo de bombeo se baja y con ello según su operación el punto de operación se modifica.

Tabla 5.8 Ejemplo de cálculo de energía anual consumida en hora punta, media y base

Identificación del equipo	Periodo Pico (Gasto máximo)					
	Q _{máx.} propuesto (m ³ /s)	Carga a Q máx. (m.c.a.)	η_{em} a Q _{máx.}	Operación (h/día)	Potencia eléctrica (kW)	Energía (kWh/año)
Pozo Factor I	0.0270	125	62.3%	8	53.14	155 181

Identificación del equipo	Periodo Medio (Gasto medio)					
	Q _{med.} propuesto (m ³ /s)	Carga a Q med. (m.c.a.)	η_{em} a Q _{med.}	Operación (h/día)	Potencia eléctrica (kW)	Energía (kWh/año)
Pozo Factor I	0.0124	165.4	50.3%	5	40.14	73 249

Identificación del equipo	Periodo Valle (Gasto mínimo)					
	Q _{mín.} propuesto (m ³ /s)	Carga a Q mín. (m.c.a.)	η_{em} a Q _{mín.}	Operación (h/día)	Potencia eléctrica (kW)	Energía (kWh/año)
Pozo Factor I	0.0070	171.7	35.5%	11	33.19	133 252

Siguiendo el mismo ejemplo, en la tabla 5.9 se presenta el cálculo de la energía anual consumida en cada uno de los periodos (pico, medio y valle), en la que se indica, siguiendo la metodología, los datos de caudal, carga, eficiencia electromecánica, número de horas de operación al día, potencia eléctrica estimada y energía eléctrica consumida por periodo.

5.3.4 Paro definitivo de equipos como resultado de un programa de reducción de fugas

Si como resultado del proyecto de eficiencia hidráulica se propone una reducción de fugas, la recuperación de caudales generada se representa como adecuación de equipos (propuestos), paro de equipos o reducción de horas

5.9 Ejemplo de cálculo de energía anual consumida en diferentes periodos

Identificación del equipo	Periodo Pico (Gasto máximo)					
	Q _{máx.} propuesto (m ³ /s)	Carga a Q máx. (m.c.a.)	η_{em} a Q _{máx.}	Operación (h/día)	Potencia eléctrica (kW)	Energía (kWh/año)
Pozo Factor I	0.0270	125	62.3%	8	53.14	155 181

Identificación del equipo	Periodo Medio (Gasto medio)					
	Q _{med.} propuesto (m ³ /s)	Carga Controlada (m.c.a.)	η_{em} a Q _{med.}	Operación (h/día)	Potencia eléctrica (kW)	Energía (kWh/año)
Pozo Factor I	0.0124	130	50.3%	5	31.55	57 572

Identificación del equipo	Periodo Valle (Gasto mínimo)					
	Q _{mín.} propuesto (m ³ /s)	Carga Controlada (m.c.a.)	η_{em} a Q _{mín.}	Operación (h/día)	Potencia eléctrica (kW)	Energía (kWh/año)
Pozo Factor I	0.0070	130	35.5%	11	25.13	100 890

De manera similar que en el caso sin variador de velocidad, la energía total anual consumida por el equipo, se calcula como la suma de la energía consumida al año en cada uno de los periodos, como se ilustra a continuación:

Energía Anual Consumida con variador = Energía consumida en periodo punta + Energía consumida en periodo intermedio + Energía consumida en periodo valle = 155 181 kWh/año + 57 572 kWh/año + 100 890 kWh/año = 313 643 kWh/año.

El ahorro de energía se calcula restando el consumo de energía anual con variador y sin variador por simple diferencia, esto es:

Energía Anual Ahorrada = Energía Anual Consumida sin variador - Energía Anual Consumida con variador = 361 682 kWh/año - 313 643 kWh/año = 48 038 kWh/año.

de operación de los equipos. El ahorro de energía resultante de esta medida se calcula de la siguiente forma:

Paso 1. Se concentran en una tabla los siguientes datos de los equipos que quedarán en reserva:

- Potencia eléctrica demandada actual del equipo propuesto a parar totalmente (P_{ept}) (kW), resultante de la estadística de facturación actual o de la medición de potencia eléctrica en campo si no se cuenta con dicha estadística
- Consumo de energía actual resultante de la estadística de facturación actual (C_{ea}) (kWh/año)
- Horas de operación anuales para el sistema de bombeo propuesto a parar en forma definitiva (hr_{op}) (horas/año)

Paso 2. Una vez determinada la potencia eléctrica, se calcula el ahorro energético por paro definitivo del equipo propuesto (ΔEE_{pt}) en kWh/año con las horas de operación anuales con la ecuación 5.17.

$$\Delta EE_{pt} = P_{prop} \times hr_{op} \quad (5.17)$$

Donde:

ΔEE_{pt} = Ahorro energético por paro definitivo del equipo (kWh/año)

P_{prop} = Potencia eléctrica del sistema de bombeo propuesto a parar definitivamente (kW)

hr_{op} = Horas de operación anuales del equipo propuesto (hr/año)

Paso 3. Una vez determinado el ahorro energético, se calcula el ahorro en facturación energética por paro definitivo del equipo, ΔFE_{pt} con la ecuación 5.18 con la fórmula:

Por equipo:

$$\Delta FE_{pt} = \Delta EE_{pt} * CUE \quad (5.18)$$

Donde:

ΔFE_{pt} = Facturación eléctrica ahorrada por paro definitivo de equipo (\$/año)

ΔEE_{pt} = Energía eléctrica ahorrada por paro definitivo de equipo (kWh/año)

CUE = Indicador de costo energético unitario específico para el sistema en estudio (\$/kWh)

Este valor se compara con la estadística de facturación actual para asegurar su consistencia.

Por el total de equipos que salen de servicio, el ahorro total de energía se calcula con la ecuación 5.19.

$$\Delta EE_t = \sum_1^{n_y} (\Delta EE_1 + \dots + \Delta EE_n) \quad (5.19)$$

Donde:

ΔEE_t = Energía ahorrada total con todos los equipos donde aplica esta medida (kWh/año)

ΔEE_1 = Energía eléctrica ahorrada en el equipo 1 (kWh/año)

ΔEE_n = Energía eléctrica ahorrada en el equipo n (kWh/año)

n_y = Número total de equipos donde aplica esta medida

Paso 3. Se realiza el cálculo de ahorros económicos anuales que se obtendrán con la implantación de la medida con la ecuación 5.20.

$$A\$_t = \Delta EE_t * CUE \quad (5.20)$$

Donde:

$A\$_t$ = Ahorro económico anual que se obtendrá con esta medida (\$/año)

ΔEE_t = Energía ahorrada total con todos los equipos donde aplica esta medida (kWh/año)

CUE = Costo unitario de la energía específico para el sistema de agua potable en estudio (\$/kWh)

Cabe repetir la observación que en el caso de los equipos de bombeo que salen de operación, las potencias y consumos toman el valor de cero y los ahorros son equivalentes a las potencias, consumos y facturaciones actuales de dichos equipos.

5.3.5 Cuantificación de ahorros de energía totales

Una vez calculados todos los ahorros, se procede a realizar un resumen de los ahorros de energía globales distinguiendo las medidas convencionales o de rápida implementación, calculadas en la sección 4.1 y las medidas resultantes de la operación hidráulica calculadas en la presente sección.

El formato sugerido para concentrar y mostrar los potenciales de ahorro de energía se presenta en la tabla 5.10.

Tabla 5.10 Formato de resumen de ahorros de energía derivados del proyecto integral

Medida de ahorro		Ahorros (1)		% (2)	Inversión (\$) (3)	Pay-Back (años) (4)
Tipo	Descripción	Energía (kWh/año)	Facturación (\$/año)			
Medidas convencionales	Optimización de eficiencia electromecánica vía sustitución de equipos de bombeo					
	Optimización del factor de potencia					
	Adecuación de tarifas					
	Ahorro de energía por optimización de las conducciones					
	Otras medidas					
	Total medidas convencionales					
Optimización de la Operación Hidráulica	Paro de equipos en hora punta					
	Equipos fuera de operación					
	Equipos que modifican su operación					
	Instalación de variadores de velocidad					
	Otras medidas					
	Total medidas					
Totales (5) :						

Los principales datos a llenar son los siguientes:

- (1) Ahorros de energía y facturación anuales para cada medida de ahorro que resulta de la sumatoria de ahorros tanto energéticos como económicos de todos los equipos o sistemas de bombeo donde aplica cada medida.
- (2) Porcentaje de ahorro por tipo de medida a efectuar. Se calcula dividiendo el ahorro de cada medida entre el consumo y costo energético anual actual.

- (3) Se calcula el costo de inversión total para cada medida.
- (4) Se estima el tiempo simple de retorno de la inversión (Pay- Back) dividiendo el valor de la inversión entre el ahorro económico anual (años).
- (5) Los totales de ahorro y porcentaje se obtienen con la sumatoria de todas las medidas y se puede realizar una sumatoria por tipo de medidas para distinguir el ahorro de energía potencializado con medidas de ahorro de energía resultantes de la operación hidráulica.

Sección 6 Indicadores de eficiencia

Los indicadores son medidas de la eficiencia y eficacia de los abastecimientos de agua con respecto a determinados aspectos de la actividad del abastecimiento y del comportamiento del sistema. La eficiencia es la medida de hasta qué punto los recursos del abastecimiento se utilizan de manera óptima para dar el servicio, mientras que la eficacia es la medida de en qué grado se han cumplido los objetivos marcados.

Un indicador de eficiencia es un número porcentual o absoluto que determina o indica el grado de avance de un organismo operador, y es un cociente que es obtenido de la información que se maneja o se registra por alguna actividad.

Cada indicador expresa el nivel de actividad en una determinada área durante un determinado periodo de tiempo, permitiendo una comparación clara con los objetivos definidos y simplificando de esta manera un análisis de por sí complejo.

En los abastecimientos de agua potable, la evaluación y uso de indicadores de eficiencia implica las ventajas siguientes:

- Permiten tener una respuesta más rápida y de mayor calidad de la operación del sistema de abastecimiento; al mismo tiempo, los indicadores permiten una monitorización más fácil de los resultados del funcionamiento;
- Facilitan información clave al abastecimiento, per-

mitiendo un fortalecimiento del enfoque pro-activo de la gestión, en contra del enfoque reactivo más tradicional, que normalmente confía en funcionamientos aparentes y erróneos del sistema;

- Crean un incentivo para adoptar medidas correctivas, como la reubicación de recursos humanos para mejorar la productividad y modernizar las rutinas y procedimientos tradicionales;
- Cuando los abastecimientos están interesados en implantar una Gestión Total de la Calidad, los indicadores pueden tener un papel relevante, como una manera de enfatizar calidad y eficiencia globales en la organización;
- Permiten a los abastecimientos implementar procedimientos rutinarios de medida de la eficiencia, ya sea internas para comparar diversas regiones o zonas, o externas para compararse con otros abastecimientos; este tipo de prácticas crea una competición saludable que de manera natural promueve la mejora de las actuaciones:
- Facilitan las auditorías, ya que constituyen un buen lenguaje técnico para que un equipo de auditores comprenda los trabajos del organismo operador y por tanto ellos puedan expresar sus recomendaciones financieras, administrativas y operativas.

En la literatura técnica¹⁶ se encuentran reportados varios modelos de indicadores, que han sido estructurados e

¹⁶ Helena Alegre, 1998, "Indicadores de gestión para abastecimientos de agua, tendencias actuales y proyectos de desarrollo", National Civil Engineering Laboratory, Lisboa Portugal, Gestión de Sequías en Abastecimientos Urbanos, Universidad de Politécnica de Valencia, Grupo de Mecánica

implantados con diferentes fines. Al respecto, se mencionan las experiencias de la Oficina de los Servicios de Agua (OFWAT) en Inglaterra y Gales, las iniciativas de la American Water Works Association (AWWA), las del Banco Mundial, las del Banco de Desarrollo Asiático, las de Holanda, el esquema de Portugal, y por último las de México.

La eficiencia en el escenario de la ingeniería de producción y distribución, particularmente en lo que concierne a las eficiencia física, hidráulica y energética, de los sistemas de abastecimiento de agua potable se recomienda utilizar los siguientes indicadores de evaluación, los cuales han sido seleccionados con base en la experiencia, como los representativos del proceso de eficiencia integral:

6.1 Indicador energético (IE)

a) Cálculo

Representa la relación exacta entre la energía utilizada por los equipos de bombeo en un sistema de agua potable para producir el volumen total del agua suministrada a la red de distribución. Para obtener el volumen de agua producido se aplica el procedimiento especificado en la sección 2.1.2 del presente Manual y es expresado en metros cúbicos al año. La energía utilizada se determina utilizando los datos del historial de consumos de energía eléctrica presentada en los recibos de la compañía de electricidad local. Los consumos en kilowatts-hora de cada equipo de bombeo del sistema se suman en un año. El Indicador Energético se calcula dividiendo el total de los kilowatts – hora consumidos en un determinado año, entre el total del agua producida en las captaciones del sistema de abastecimiento.

$$IE = \frac{\text{Energía total consumida (kW h/año)}}{\text{Volumen total de agua producida en captaciones (m}^3\text{/año)}} \quad (6.1)$$

b) Meta

No existe un indicador de la media nacional, puesto que depende en gran medida del tipo de captaciones de agua que se dispongan en el sistema de abastecimiento y de la topografía de la ciudad; sistemas con suministro de agua solo por bombeo y topografías muy accidentadas

tenderán a elevar el indicador; de igual forma sistemas con muchas fugas en la red, harán que se incremente el volumen de agua suministrada, y aumentando la energía utilizada para producir esa cantidad de agua adicional. Para un organismo operador este indicador irá a la baja cuando se reduzcan los consumos de energía con equipos de bombeo eficientes y en la medida en que se reduzcan las fugas en la red.

6.2 Indicador de costo unitario de energía (CUE)

a) Cálculo

Representa el costo específico por unidad de energía consumida, el cual depende de varios factores como el tipo de tarifa eléctrica contratada, el factor de carga (que refleja las horas de operación reales sobre las horas naturales) y factores que inciden en la facturación energética como la penalización o bonificación por el factor de potencia de la instalación.

Este indicador se calcula en base a la estadística de consumo y facturación energética anual recopilada en el organismo operador así como la producción anual de agua potable.

$$CUE = \frac{\text{Importe de facturación eléctrica (\$/año)}}{\text{energía total consumida (kWh/año)}} \quad (6.2)$$

b) Meta

Al igual que el indicador anterior, no existe un valor medio en el país. La meta del indicador corresponde a cada organismo operador fijarla en función de su infraestructura electromecánica y los costos respectivos.

6.3 Indicador de eficiencia física (IEF)

a) Cálculo

Este indicador permite identificar las pérdidas de agua en la red de distribución de un sistema de agua potable, principalmente.

El indicador de eficiencia física se calcula en porcentaje, dividiendo el valor del volumen de agua facturada (consumida) por los usuarios, entre el volumen de agua producida en el sistema de agua potable en un tiempo determinado. Es importante mencionar que el agua consumida no necesariamente es el agua facturada, debido a las imprecisiones de los micromedidores, la asignación de consumos de cuotas fijas, errores de lectura y facturación. No obstante, en ausencia de datos en México se puede utilizar el valor del consumo facturado como una aproximación, para calcular el indicador de eficiencia física, en tanto se obtienen los errores mencionados.

$$\text{Eficiencia física (\%)} = \frac{\text{Volumen de agua facturada (m}^3/\text{tiempo)}}{\text{Volumen de agua suministrada (m}^3/\text{tiempo)}} \cdot 100$$

(6.3)

b) Meta

En México se ha estimado que un valor de la eficiencia física del 80% es un valor bastante aceptable y alcanzable, no obstante en algunos países se han logrado valores inferiores al 15%. Valores inferiores al 80% reflejan oportunidades de ahorro de agua importantes para el organismo operador y en la conservación de las fuentes de abastecimiento.

6.4 Dotación promedio por habitante

(D_p)

a) Cálculo

Indica el nivel de dotación comparativa respecto a los estándares de consumo por parte de los usuarios finales. Se calcula dividiendo el consumo diario total de usuarios, más las respectivas fugas de agua, dividido entre el número total de habitantes servidos.

$$D_p = \frac{V_{\text{volumen suministrado}} (\text{m}^3/\text{año})}{N_{\text{habitantes servidos}} * 365} * 1000$$

(6.4)

b) Meta

La dotación promedio de una localidad incluye el consumo doméstico y las partes proporcionales a los usos no-doméstico y fugas, que les corresponderían hipotéticamente a los habitantes de una localidad. En México el consumo doméstico se recomienda estimarlo con base en el tipo de clima y en la distribución porcentual de las clases socioeconómicas existentes en una localidad. De igual manera, el valor de la dotación dependerá de otros factores importante como el desarrollo comercial, industrial y hotelero, y en buena medida, el nivel existente de fugas que prevalezca en la red de tuberías. No obstante, lo antes mencionado, se estima que un valor medio nacional de dotación es adecuado si es del orden de los 220 l/hab/día.

6.5 Indicador de continuidad en el servicio (ICS)

a) Cálculo

Indica el nivel de tandeos y el potencial de mejora del servicio. Se determina como la división de las horas de servicio continua, entre las horas naturales. Su valor se calcula con la ecuación 3.3 descrita en la sección 3.1.3 de este Manual.

b) Meta

Todos los sistemas de agua potable deberán cumplir con un promedio de 24 horas de servicio diariamente, los 365 días del año. Un indicador de continuidad en el servicio igual a uno, implica que el servicio es muy eficiente y deseable. En la medida en que el indicador de continuidad disminuya, se tratará de sistemas de agua potable con menor eficiencia.

Anexos

Anexo A Formatos para recopilación de información y datos

Formato A.1) Información general de la localidad													
Nombre:													
Municipio:													
Estado:													
Coordenadas Geográficas	Latitud:												
	Longitud:												
	Altitud Media:												
Superficie de la mancha urbana:													
Distancia a ciudades vecinas	Ciudad			Orientación			Distancia (km)						
				Norte: Sur: Este: Oeste:									
Clima	Ene	Feb	Mzo	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
Temperatura (°C)													
Precipitación (mm)													
Cuerpos de agua cercanos (Ríos, lagos, presas, etc.)	Nombre						Distancia (km)						
Población censal (INEGI)													
Año	Población (habitantes)		Tasa de crecimiento (%)		Número de viviendas		Índice de hacinamiento						
1980													
1990													
2000													
2005													
Número total de unidades consumidoras de agua (con y sin conexión)	Vivienda	Comercio	Industria	Hotel	Oficina pública	Escuela							

Formato A.2) Infraestructura hidráulica**Agua potable**

Anexar el esquema del sistema de abastecimiento de agua potable, mostrando la localización y las principales características de todos los elementos que lo componen, y el contorno de la mancha urbana.

Fuentes de abastecimiento (Lago, presa, río, acuífero, manantial, otro)

Tipo	Nombre	Caudales (l/s)			Extracción anual (m ³ x 1000)	Concesión (sí/no)
		Mínimo	Medio	Máximo		
Total						

Conducciones (Acero, fierro fundido, PVC, concreto, A-C, PEAD, otro)

Origen/destino	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Material	Caudales (l/s)		Edad (años)	Estado físico (% bueno)
				Diseño	Operación		

Equipos de bombeo

Nombre	Potencia (HP)	Presión manométrica (kg/cm ²)	Caudales (l/s)		Edad (años)	Estado físico (% bueno)
			Diseño	Operación		

Plantas potabilizadoras (cloración, filtración rápida, filtración lenta, convencional completo, otro)

Nombre y ubicación	Tipo de proceso	Capacidad (l/s)		Edad (años)	Estado físico (% bueno)
		Instalada	Operación		

Tanques de regularización (elevado, superficial, subterráneo) (mampostería, concreto, acero)

Nombre y ubicación	Tipo	Material	Volumen (m ³)	Edad (años)	Estado físico (% bueno)

Red de distribución (Longitud en kilómetros)							
Diámetro (pulgadas)	Materiales						Total
	Fierro fundido	Fierro galvanizado	Asbesto-cemento	PVC	PEAD	otros	
2							
2 ½							
3							
4							
6							
8							
10							
12							
14							
16							
18							
20							
24							
30							
Total							
Edad de la red (% longitud)	0 a 5 años	5.1 a 10 años	10.1 a 20 años	Más de 20 años			
Estado de la red (% longitud)	Muy Bueno	Bueno	Regular	Malo			

Válvulas y dispositivos de protección a la red	Seccionamiento	Retención	Purga	Alivio	VAEA	VRP	Cajas de válvulas
Cantidad							
Estado físico actual (Bueno %)							

Conexiones domiciliarias (cantidad)						
Diámetro (pulgadas)	Materiales					Total
	Cobre	Fierro galvanizado	PVC	PEAD	otros	
½						
¾						
1						
1 ½						
2						
Total						

Formato A.3) Infraestructura hidráulica		Suministro de agua
Los datos presentados aquí deben ser obtenidos de los registros de macromedición y corregidos con los resultados de la campaña de medición		
Nivel de cobertura (%):	Volumen anual producido (m ³ x1000):	
Distribución temporal de producción de agua (Últimos 12 meses)		
Mes/año	Caudal (l/s)	Volumen Producido (m ³ x 1000)
Total		

Continuidad en el servicio (promedio semanal)					
Continuidad (horas/día)	24	de 18 a 23	De 12 a 17	De 6 a 11	Menos de 6
Cantidad de conexiones (%)					

Se deben ubicar los macromedidores existentes en un esquema y sobre un croquis del sistema de abastecimiento.

Macromedidores instalados

Primarios de caudal	Tipo	Cantidad	Funcionando	Error de exactitud (%)	Frecuencia de calibración	Estado físico (bueno, regular, malo)
Presión diferencial Velocidad Electromagnético Ultrasónico otro						
Primarios de presión						
Primarios de nivel						
Regla móvil Escala graduada Manguera Flotador						

Grado de cobertura de macromedidores

Lugar	Porcentaje existente (%)	Macromedidores faltantes
Captaciones -Pozos -Presas -Galerías -Manantiales -Plantas potabilizadoras -Puntos de suministro a la red		

Formato A.5) Infraestructura hidráulica	Cuantificación de pérdidas
Calcular los valores de pérdidas en porcentaje del volumen suministrado(%) siguientes en los últimos doce meses:	
<ul style="list-style-type: none"> -Pérdidas globales del sistema -Pérdidas en conducción -Pérdidas en Potabilización -Pérdidas en distribución 	

Formato A.6) Infraestructura hidráulica	Control de fugas
Ubicar en un croquis anexo de la red de distribución, las zonas con mayor incidencia de fugas	

Incidencia de fugas en los últimos doce meses				Ocurrencia de fugas	
Mes/año	Cantidad	Volumen de Pérdidas (m ³ x1000)		Lugar	Porcentaje (%)
				Red secundaria Red primaria Tomas domiciliarias Válvulas Otros	
Total				Total	100

Clasificación de fugas (ocurrencia anual)				
Tipo de fugas		Cantidad		Porcentaje (%)
Visible				
Oculta				
Total				

Clasificación de fugas por tipo de material (ocurrencia anual)		
Material donde ocurren las fugas	Red (%)	Conexiones domiciliarias (%)
Visible		
Oculta		
Total		

Causas de fugas (ocurrencia anual)		
Causas	Red (%)	Conexiones domiciliarias (%)
Diseño		
Mala calidad del material		
Mal almacenamiento y manejo		
Defectos de instalación		
Sobrepresión hidráulica		
Tráfico pesado		
Profundidad insuficiente		
Agresión del terreno		
Otras (especificar)		
Total		

Detección de fugas			
Fugas visibles (%)		Fugas Ocultas (%)	
Por inspección del organismo		Recorrido por la red	
Operadores		Medición de consumo nocturno	
Reportes del público		Recorrido selectivo de la red	
Total		Total	

NOTA: Se debe anotar los equipos utilizados para la localización de fugas (Geófono, localizador de metales, detector electrónico, correlador, otros)

Personal de detección de fugas	
Personal	Cantidad
Ingenieros	
Técnicos	
Auxiliares	

Reparación de fugas (últimos doce meses)			
Mes/año	Cantidad		
	Reportadas	Reparadas (%)	
Total			

Tiempo, personal y caudales promedio de reparación de fugas			
Lugar de la fuga	Tiempo (horas)	Personal	Caudal medio (l/s)
Red primaria			
Red secundaria			
Tomas domiciliarias			
Válvulas			
Otros			

Formato A.7) Sistema comercial	Consumo de agua
Los datos presentados aquí deben provenir de padrón de usuarios y del registro de facturación de los volúmenes consumidos, y serán corregidos con las campañas de mediciones de campo.	
Consumo promedio en conexiones con micromedidor (m ³ /mes/conexión):	
Consumo promedio en conexiones sin micromedidor (m ³ /mes/conexión):	

Clasificación de usuarios por tipo de conexión		
Tipo	Cantidad de conexiones	
	Número	Porcentaje
Doméstico individual		
Doméstico colectivo		
Comercial		
Hotelero		
Industrial		
Público		
Total		

Distribución por rangos de consumo (promedio mensual)				
Rango de consumo (m ³ /toma/mes)	Cantidad de conexiones		Volúmenes (m ³ x1000)	
	Número	Porcentaje	Número	Porcentaje
0 a 10				
10.1 a 15				
15.1 a 20				
20.1 a 30				
31,1 a 50				
50.1 a 100				
100.1 a 200				
200.1. a 500				
500.1 a 1000				
más de 1000				
Total				

Formato A.8) Sistema comercial			Micromedición	
Micromedidores instalados				
Capacidad (m ³ /hora)	Exactitud media (%)	Cantidad (Numero/porcentaje)	Marca	Antigüedad total (%)
				0 a 3 años (%): 3.1 a 5 años (%): 5.1 a 10 años (%): 10.1 a 20 años (%): más de 20 años (%):
Total				

Cobertura de micromedición

Cobertura de micromedición	$\text{Cob}_{\text{micr}} = \frac{\# \text{ Micromedidores instalados} \times 100}{\# \text{ Tomas domiciliarias}}$	Cobertura de micromedidores funcionando	$\text{Cob}_{\text{micr f}} = \frac{\# \text{ Micromedidores funcionando} \times 100}{\# \text{ Tomas domiciliarias}}$
----------------------------	---	---	--

Mantenimiento de micromedición

Sustitución de micromedidores	Sistemática: Esporádica: No se hace:	Método de detección de fallas	Reporte de lecturistas: Aviso de usuarios: Inspección continua: Otros:
-------------------------------	--	-------------------------------	---

Distribución de consumos en micromedidores

Tamaño del micromedidor (pulgadas)	Número de micromedidores	Consumo anual (m ³)	Porcentaje de consumo (%)	
5/8				
3/4				
1				
1 1/2				
2				
3				
4				
6				
Sin micromedidor				
Total				

Mes	Tipo de uso			Total (m ³)
	Doméstico (m ³)	Comercial (m ³)	Industrial (m ³)	
Enero				
Febrero				
Marzo				
...				
Diciembre				
Total				

Mes	Número de usuarios por nivel socioeconómico			
	Residencial (m ³)	Medio (m ³)	Popular (m ³)	
Enero				
Febrero				
Marzo				
...				
Diciembre				
Total				

Tabla A.1 Formato de campo para levantamiento físico de inspección y aforo de fugas en tomas domiciliarias

1. Datos generales de la toma domiciliaria						
Nombre del usuario:.....Domicilio:.....						
Sector:.....Ciudad:.....Fecha:.....Hora:.....No. de toma:.....						
2. Presiones (kg/cm ²)						
Enfrente	Lado	Domicilio	Lado			
3. Material de la toma domiciliaria inspeccionada						
Tipo de tubería de la toma						
Fierro galvanizado	Polietileno	Cobre	Poliducto	PVC		
4. Ubicación del domicilio (croquis)						
5. EXCAVACION: Profundidad respecto al nivel de la calle:.....cm						
Tipo de pavimento a lo largo de la toma pavimento					Estado del pavimento	
Concreto	Asfalto	Terracería	Empedrado	Otro	Bueno	Deteriorado
Material de excavación						
Arena	Grava	Tezontle	Tierra	Arcilla	Roca	Piedras
						Otros
6. Material de la tubería de la toma con fuga. Diámetro:.....Plg						
Tipo de tubería de la toma con fuga					Estado	
Fierro galvanizado	Polietileno	Cobre	Poliducto	PVC	Bien	Mal
7. Lugar de la fuga						
Abrazadera	Niple o cople	Codo	Tubería flexible	Tubería rígida	Tuerca unión del medidor	Llave de paso
						Otro
Señalar el lugar de la fuga						
8. Tipo de fuga						
Rajadura	Perforación	Rotura	Corte	Rosca floja	Otro (especificar)	
9. Aforo de fuga						
No. de medición	Volumen (ml) y tiempo (s)					
1						
2						
3						
Promedio						
10. Reparación: hora de iniciohora de terminación.....						
11. No. de personas de la brigada:.....Equipo de medición utilizado:						

Anexo B Propiedades hidráulicas y medición

Tabla B.1 Rugosidad en tuberías nuevas

Material de la tubería	Rugosidad (mm)
Vidrio, cobre, plástico, hule	0.0015
Fierro fundido nuevo	0.005 a 0.01
Fierro fundido semioxidado	0.010 a 0.015
Fierro fundido oxidado	0.015 a 0.030
Cemento liso	0.003 a 0.008
Acero	0.04 a 0.10
Asbesto cemento	0.025
Concreto	0.16 a 2.0

Tabla B.2 Factores de incremento del coeficiente de cortante f por envejecimiento de tuberías

Material de la tubería	Factor de incremento del coeficiente de cortante f por envejecimiento
PVC	1.2
Acero galvanizado	1.85
Acero	1.85
Hierro dúctil	2.0
Polietileno de alta densidad	1.2

Tabla B.3 Viscosidad cinemática del agua en función de la temperatura

Temperatura (°C)	Viscosidad cinemática		Temperatura (°C)	Viscosidad cinemática	
	(Stokes)	(m ² /s)		(Stokes)	(m ² /s)
0	0.01793	1.793 E-6	26	0.00873	0.873 E-6
2	0.01674	1.674 E-6	28	0.00836	0.836 E-6
4	0.01568	1.568 E-6	30	0.00802	0.802 E-6
6	0.01474	1.474 E-6	32	0.00769	0.769 E-6
8	0.01386	1.386 E-6	34	0.00738	0.738 E-6
10	0.01307	1.307 E-6	36	0.00711	0.711 E-6
12	0.01236	1.236 E-6	38	0.00684	0.684 E-6
14	0.01170	1.170 E-6	40	0.00658	0.658 E-6
16	0.01109	1.109 E-6	50	0.00547	0.547 E-6
18	0.01055	1.055 E-6	60	0.00468	0.468 E-6
20	0.01004	1.004 E-6	70	0.00404	0.404 E-6
22	0.00957	0.957 E-6	80	0.00353	0.353 E-6
24	0.00914	0.914 E-6	90	0.00313	0.313 E-6

Figura B.1 Curva típica de exactitud de medidores de agua potable

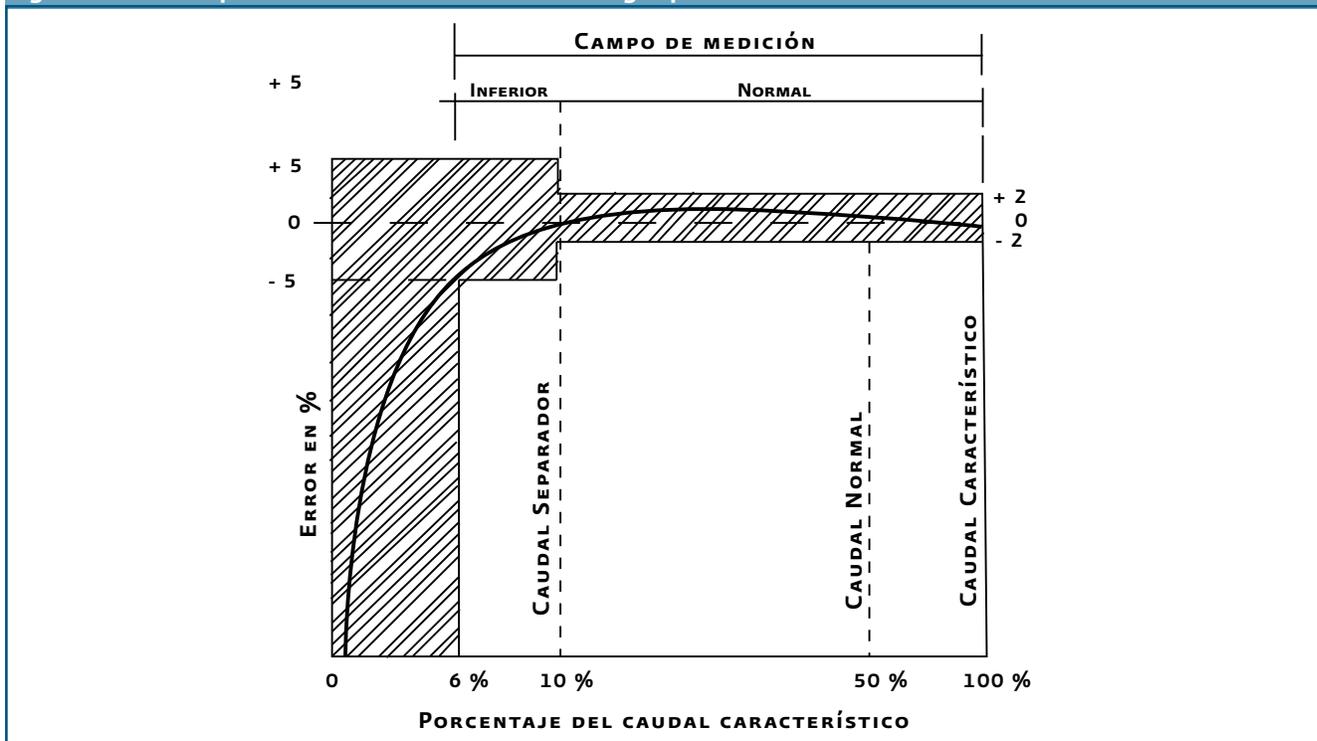
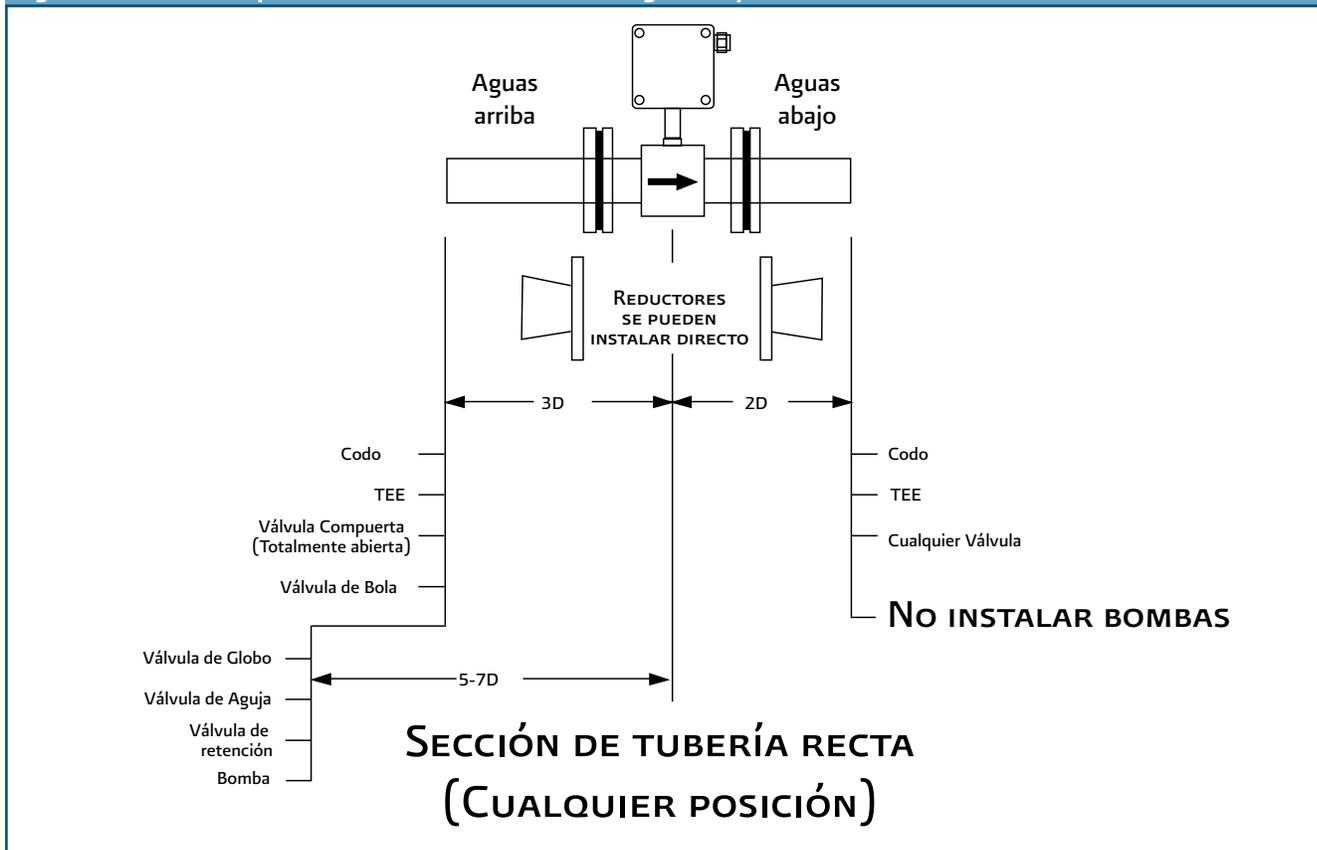


Figura B.2 Distancias para ubicar un medidor electromagnético y obtener mediciones confiables



Anexo C Formato del balance de agua

Balance de agua potable		
Período de análisis (días) =		
Lugar: distrito hidrométrico		Unidad: m ³
Línea	Concepto	Cantidad m ³
Tarea 1. Cuantificación del suministro de agua		
1	Suministro total de agua sin corregir	
2A	Error en exactitud de medidores de la fuente de abastecimiento (+ó-)	
2B	Cambio en reservas y tanques de almacenamiento (+ó-)	
2C	Otras contribuciones o pérdidas (+ó-)	
3	Total de ajustes en el suministro total de agua (sumar líneas 2A, 2B y 2C)	
4	Suministro total de agua corregido (sumar líneas 1 y 3)	
Tarea 2. Estimación de consumos medidos autorizados		
5	Consumo medido total de agua autorizado sin corregir	
Tarea 3. Estimación de consumos no medidos autorizados		
6	Usuarios con cuota fija	
7	Reparación de tuberías	
8	Proceso de plantas de tratamiento y potabilizadoras	
9	Escuelas	
10	Parques públicos	
11	Agua para incendio	
12	Otros servicios	
13	Consumo total no medido autorizado (sumar líneas 6 a 12)	
Tarea 4. Pérdidas identificadas y eliminadas		
14	Error en medidores domésticos (+ó-)	
15	Error en medidores comerciales, industriales y especiales (+ó-)	
16	Error de defase en periodo de lectura del medidor (+ó-)	
17	Usos clandestinos regularizados	
18	Fugas reparadas (eliminadas)	
19	Errores en cuota fija (+ó-)	
20	Derrames en tanques y cárcamos de bombeo	
21	Evaporación en depósitos abiertos	
22	Errores descubiertos en el proceso contable	
23	Otras pérdidas	
24	Pérdidas totales identificadas y eliminadas (sumar líneas 14 a 23)	
Tarea 5. Estimación de pérdidas potenciales totales		
25	Pérdidas potenciales de agua potable (restar líneas 5, 13 y 24 de 4)	
Tarea 6. Estimación de pérdidas aparentes potenciales		
26	Usos clandestinos	
27	Fraudes	
28	Pérdidas aparentes totales potenciales	
Tarea 7. Estimación de pérdidas reales potenciales		
29	Fugas en tomas domiciliarias	
30	Fugas en tuberías	
31	Fugas en cajas de válvulas	
32	Otras fugas	
33	Pérdidas reales potenciales (totales por fugas)	

Anexo D Estructura tarifaria

Tarifa 6 (2012)

Servicio para bombeo de aguas potables o negras, de servicio público

- 1.- **Aplicación.-** Esta tarifa se aplicará al suministro de energía eléctrica para servicio público de bombeo de aguas potables o negras.
- 2.- **Cuotas aplicables en el mes de febrero de 2012.-**
 - 2.1 Cargo fijo, independiente de la energía consumida.- \$ 268.46
 - 2.2 Cargo adicional por la energía consumida.- \$ 1.475 por cada kilowatt-hora.
- 3.- **Mínimo mensual.-** Cuando el usuario no haga uso del servicio, cubrirá como mínimo el cargo a que se refiere el inciso 2.1.
- 4.- **Demanda por contratar.-** La demanda por contratar la fijará inicialmente el usuario; su valor no será menor de 60% de la carga total conectada ni menor de la capacidad del mayor motor o aparato instalado. Cualquier fracción de kilowatt se tomará como kilowatt completo.
- 5.- **Depósito de garantía.-** Será de 4 veces el mínimo mensual aplicable.
- 6.- **Servicio en tarifa de uso general.-** Los usuarios podrán solicitar su incorporación a la tarifa de uso general que corresponda, cuando las características de sus instalaciones y las del suministrador lo permitan.

Tarifa O-M (2012)

Tarifa ordinaria para servicio general en media tensión, con demanda menor a 100 kW

- 1.- **Aplicación.-** Esta tarifa se aplicará a los servicios que destinen la energía a cualquier uso, suministrados en media tensión, con una demanda menor a 100 kW
- 2.- **Cuotas aplicables en el mes de febrero de 2012.-** Se aplicarán los siguientes cargos por la demanda máxima medida y por la energía consumida:

Región	Cargo por kilowatt de demanda máxima medida	Cargo por kilowatt - hora de energía consumida
Baja California	\$ 130.90	\$ 1.179
Baja California Sur	\$ 142.44	\$ 1.432
Central	\$ 163.46	\$ 1.438
Noreste	\$ 150.30	\$ 1.343
Noroeste	\$ 153.45	\$ 1.334
Norte	\$ 150.93	\$ 1.343
Peninsular	\$ 168.75	\$ 1.373
Sur	\$ 163.46	\$ 1.389

- 3.- **Mínimo mensual.-** El importe que resulta de aplicar 10 veces el cargo por kilowatt de demanda máxima medida.
- 4.- **Demanda contratada.-** La demanda contratada la fijará inicialmente el usuario; su valor no será menor del 60% de la carga total conectada, ni menor de 10 kilowatts o la capacidad del mayor motor o aparato instalado.
En el caso de que el 60% de la carga total conectada exceda la capacidad de la subestación del usuario, sólo se tomará como demanda contratada la capacidad de dicha subestación a un factor de 90%.
- 5.- **Temporadas de verano y fuera de verano.-** Para la aplicación de las cuotas en las regiones Baja California y Baja California Sur se definen las siguientes temporadas:
Verano:
Región Baja California: del 1 de mayo, al sábado anterior al último domingo de octubre.
Región Baja California Sur: del primer domingo de abril, al sábado anterior al último domingo de octubre.
Fuera de verano:
Región Baja California: del último domingo de octubre al 30 de abril.
Región Baja California Sur: del último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril.
- 6.- **Demanda máxima medida.-** La demanda máxima medida se determinará mensualmente por medio de instrumentos de medición, que indican la demanda media en kilowatts, durante cualquier intervalo de 15 minutos, en el cual el consumo de energía eléctrica sea mayor que en cualquier otro intervalo de 15 minutos en el periodo de facturación.

Cualquier fracción de kilowatt de demanda máxima medida se tomará como kilowatt completo.

Cuando la demanda máxima medida exceda de 100 kilowatts, el usuario deberá solicitar al suministrador su incorporación a la tarifa H-M. De no hacerlo, al tercer mes consecutivo en que exceda la demanda de 100 kilowatts, será reclasificado por el suministrador en la tarifa H-M, notificándolo al usuario.

Resulta de aplicar 2 veces el importe del cargo por demanda máxima medida a la demanda contratada.

Tarifa H-M (2012)

Tarifa horaria para servicio general en media tensión, con demanda de 100 kW o más

- 1.- **Aplicación.-** Esta tarifa se aplicará a los servicios que destinen la energía a cualquier uso, suministrados en media tensión, con una demanda de 100 kilowatts o más.
- 2.- **Cuotas aplicables en el mes de febrero de 2012.-** Se aplicarán los siguientes cargos por la demanda facturable, por la energía de punta, por la energía intermedia y por la energía de base.

3.- **Mínimo mensual.-** El importe que resulta de aplicar el cargo por kilowatt de demanda facturable al 10% de la demanda contratada.

4.- **Demanda contratada.-** La demanda contratada la fijará inicialmente el usuario; su valor no será menor del 60% de la carga total conectada, ni menor de 100 kilowatts o la capacidad del mayor motor o aparato instalado.

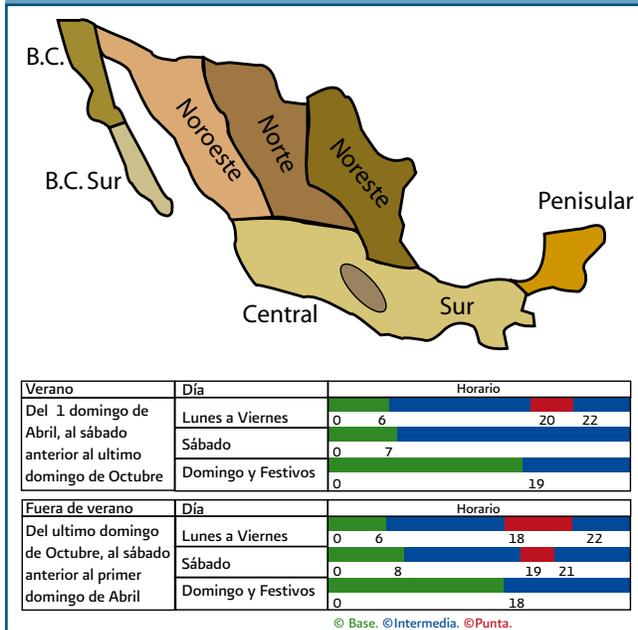
En el caso de que el 60% de la carga total conectada exceda la capacidad de la subestación del usuario, sólo se tomará como demanda contratada la capacidad de dicha subestación a un factor de 90%.

5.- **Horario.-** Para los efectos de la aplicación de esta tarifa, se utilizarán los horarios locales oficialmente establecidos. Por días festivos se entenderán aquellos de descanso obligatorio, establecidos en el artículo 74 de la Ley Federal del Trabajo, a excepción de la fracción IX, así como los que se establezcan por Acuerdo Presidencial.

6.- **Periodos de punta, intermedio y base.-** Estos periodos se definen en cada una de las regiones tarifarias para distintas temporadas del año, como se describe a continuación.

Región	Cargo por kilowatt de demanda facturable	Cargo por kilowatt - hora de energía de punta	Cargo por kilowatt - hora de energía intermedia	Cargo por kilowatt - hora de energía de base
Baja California	\$ 257.22	\$ 2.2194	\$ 1.1869	\$ 0.9326
Baja California Sur	\$ 247.21	\$ 1.7807	\$ 1.6472	\$ 1.1655
Central	\$ 178.23	\$ 2.1274	\$ 1.3146	\$ 1.0988
Noreste	\$ 163.86	\$ 1.9649	\$ 1.2204	\$ 0.9997
Noroeste	\$ 167.35	\$ 1.9763	\$ 1.2110	\$ 1.0145
Norte	\$ 164.67	\$ 1.9790	\$ 1.2322	\$ 1.0022
Peninsular	\$ 184.16	\$ 2.0809	\$ 1.2350	\$ 1.0173
Sur	\$ 178.23	\$ 2.0832	\$ 1.2560	\$ 1.0451

Figura D.1 Regiones para aplicación de tarifas HM



Región Baja California

Del 1º de mayo al sábado anterior al último domingo de octubre

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes		0:00 - 14:00 14:00 - 18:00	18:00 - 24:00
sábado		0:00 - 24:00	
domingo y festivo		0:00 - 24:00	

Del último domingo de octubre al 30 de abril

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 17:00 22:00 - 24:00	17:00 - 22:00	
sábado	0:00 - 18:00 21:00 - 24:00	18:00 - 21:00	
domingo y festivo	0:00 - 24:00		

Región Baja California Sur

Del primer domingo de abril al sábado anterior al último domingo de octubre

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes		0:00 - 12:00 22:00 - 24:00	12:00 - 22:00
sábado		0:00 - 19:00 22:00 - 24:00	19:00 - 22:00
domingo y festivo		0:00 - 24:00	

Del último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 18:00 22:00 - 24:00	18:00 - 22:00	
sábado	0:00 - 18:00 21:00 - 24:00	18:00 - 21:00	
domingo y festivo	0:00 - 19:00 21:00 - 24:00	19:00 - 21:00	

Del primer domingo de abril al sábado anterior al último domingo de octubre

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 20:00 22:00 - 24:00	20:00 - 22:00
sábado	0:00 - 7:00	7:00 - 24:00	
domingo y festivo	0:00 - 19:00	19:00 - 24:00	

Del último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 18:00 22:00 - 24:00	18:00 - 22:00
sábado	0:00 - 8:00	8:00 - 19:00 21:00 - 24:00	19:00 - 21:00
domingo y festivo	0:00 - 18:00	18:00 - 24:00	

7.- Demanda facturable.- La demanda facturable (DF) se define como se establece a continuación:

$$DF = DEM_p + FRI \times \max (DEM_i - DEM_p, 0) + FRB \times \max (DEM_b - DEM_p, 0)$$

Donde:

DEM_p = Demanda máxima medida en el periodo de punta

DEM_i = Demanda máxima medida en el periodo intermedio

DEM_b = Demanda máxima medida en el periodo de base

$DEM_{p,i}$ = Demanda máxima medida en los periodos de punta e intermedio

FRI y FRB son factores de reducción que tendrán los siguientes valores, dependiendo de la región tarifaria:

Región	FRI	FRB
Baja California	0.141	0.070
Baja California Sur	0.195	0.097
Central	0.300	0.150
Noreste	0.300	0.150
Noroeste	0.300	0.150
Norte	0.300	0.150
Peninsular	0.300	0.150
Sur	0.300	0.150

En las fórmulas que definen las demandas facturables, el símbolo "max" significa máximo, es decir, que cuando la diferencia de demandas entre paréntesis sea negativa, ésta tomará el valor cero.

Las demandas máximas medidas en los distintos periodos se determinarán mensualmente por medio de instrumentos de medición, que indican la demanda media en kilowatts, durante cualquier intervalo de 15 minutos del periodo en el cual el consumo de energía eléctrica sea mayor que en cualquier otro intervalo de 15 minutos en el periodocorrespondiente.

Cualquier fracción de kilowatt de demanda facturable se tomará como kilowatt completo.

Cuando el usuario mantenga durante 12 meses consecutivos valores de DP, DI y DB inferiores a 100 kilowatts, podrá solicitar al suministrador su incorporación a la tarifa O-M.

8.- Energía de punta, intermedia y de base.- Energía de punta es la energía consumida durante el periodo de punta.

Energía intermedia es la energía consumida durante el periodo intermedio.

Energía de base es la energía consumida durante el periodo de base.

9.- Depósito de garantía.- Será de 2 veces el importe que resulte de aplicar el cargo por demanda facturable a la demanda contratada.

Figura D.2 Cargo por factor de potencia menor a 90%

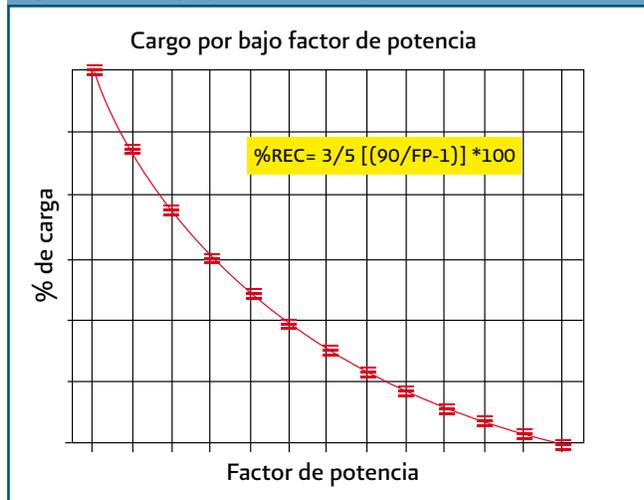


Figura D.3 Bonificación por alto factor de potencia, mayor al 90%

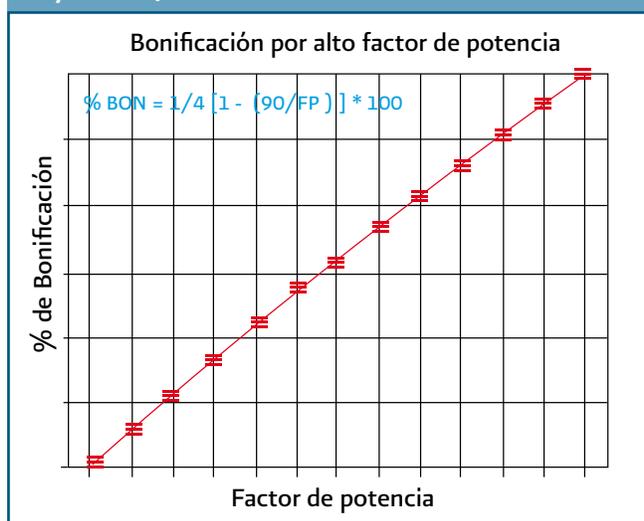


Tabla D.1 Formato típico para registrar la estadística de facturación eléctrica

Cía Suministradora: _____ Tarifa: _____

Tensión de suministro: _____ Volt Número de Servicio: _____

Historial de Facturación (Tarifas Horarias)

Mes	Horario de Punta		Horario intermedio		Horario Base		Factor de Potencia
	Demanda (kW)	Consumo (kWh)	Demanda (kW)	Consumo (kWh)	Demanda (kW)	Consumo (kWh)	

Anexo E Tablas y gráficas de referencia electromecánica

Anexo E.1 Tablas y gráficas de referencia en el diagnóstico y proyecto de eficiencia energética

Potencia nominal (kVA)	Pérdidas en el hierro (P_{FE})	Pérdidas en el cobre a potencia nominal (P_{CU})
25	195	670
50	345	810
75	400	1 080
100	435	1 085
125	480	2 350
160	490	2 600
200	570	3 400
250	675	4 230
315	750	5 250
400	900	6 200
500	1 000	8 050
630	1 250	9 000
800	1 690	10 800
1 000	1 800	12 600
1 250	2 010	16 800
1 600	2 500	19 000
2 000	2 750	23 900
2 500	3 480	29 600
3 150	3 500	30 500
4 000	4 300	34 000
5 000	5 000	39 500
6 300	6 300	45 000
8 000	7 000	57 000
10 000	7 600	68 500

Figura E.1 Eficiencia típica vs. curvas de carga para motores de inducción de jaula de diseño B, 1 800 RPM

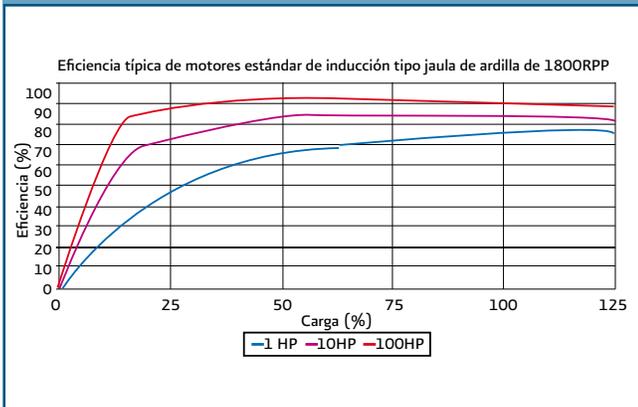


Figura E.4 Factor de potencia en motores de inducción

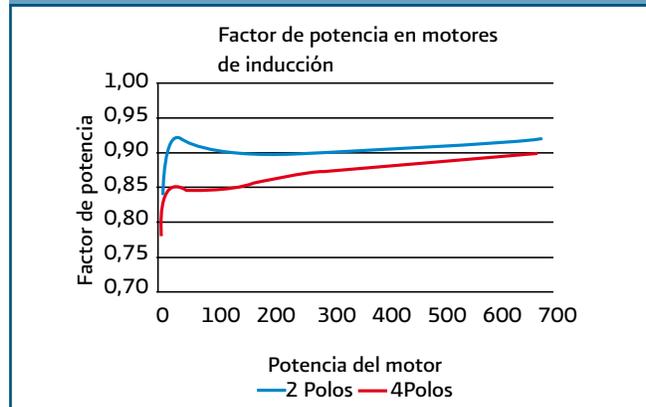


Figura E.2 Depreciación de la eficiencia de un motor en función de la desviación del voltaje respecto al nominal

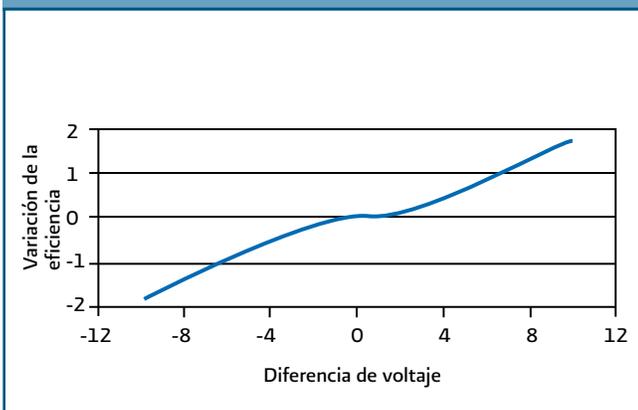


Figura E.5 Factor de potencia como función del factor de carga en un motor

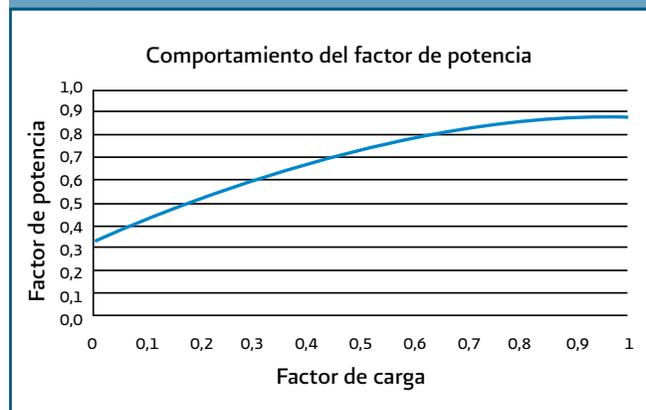
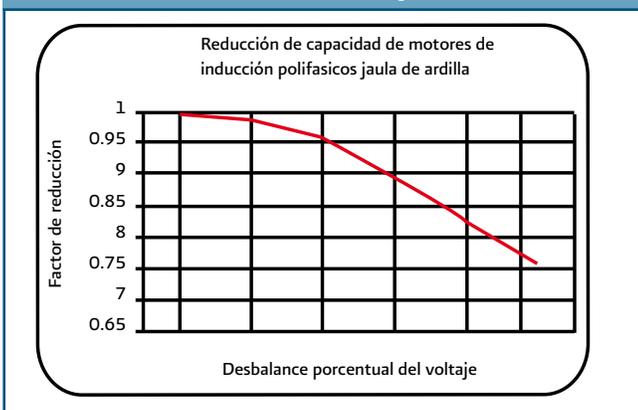


Figura E.3 Depreciación de la eficiencia de un motor en función del desbalance de voltaje



Anexo E.2 Cálculos eléctricos e hidráulicos

Desbalance de voltaje ($Desb_v$)

El desbalance de voltaje se calcula a partir de las mediciones de tensión entre fases, por medio de la ecuación E.1.

$$Desb_v = \frac{\text{Máximo} \left[\left(V_{\max} (V_{AB}, V_{BC}, V_{CA}) - V_{\text{prom}} \right), \left(V_{\text{prom}} - V_{\min} (V_{AB}, V_{BC}, V_{CA}) \right) \right]}{V_{\text{prom}}} * 100 \quad (E.1)$$

Donde:

$Desb_v$ = Desbalance de voltaje

V_{AB} = Tensión entre las fases A y B

V_{BC} = Tensión entre las fases B y C

V_{CA} = Tensión entre las fases C y A

V_{prom} = Tensión promedio entre fases

Desbalance de corriente ($Desb_i$)

$$Desb_i = \frac{\text{Máximo} \left[\left(\text{Max} (I_A, I_B, I_C) - I_{\text{prom}} \right), \left(I_{\text{prom}} - \text{mín} (I_A, I_B, I_C) \right) \right]}{I_{\text{prom}}} * 100 \quad (E.2)$$

Donde:

$Desb_i$ = Desbalance de corriente

I_A = Corriente de la fase A

I_B = Corriente de la fase B

I_C = Corriente de la fase C

I_{prom} = Corriente promedio de las tres fases

Voltaje de alimentación diferente al nominal (V_{DN})

El valor de la tensión de alimentación diferente a la nominal, se calcula en términos porcentuales de acuerdo a la ecuación E.3.

$$V_{DN} = \frac{(V_{\text{prom}} - V_{\text{placa}})}{V_{\text{placa}}} * 100 \quad (E.3)$$

Donde:

V_{DN} = Diferencia porcentual entre el valor del voltaje de alimentación y el dato de placa del voltaje nominal.

V_{prom} = Voltaje promedio entre fases

V_{placa} = Valor de voltaje nominal de alimentación, indicado en la placa.

Carga de velocidad (Hv)

La carga de velocidad se determina con la ecuación E.4.

$$H_v = \frac{V_{td}^2}{2g} \quad (E.4)$$

Donde:

V_{td} = Es la velocidad del agua en la tubería de descarga, en m/s

g = Aceleración de la gravedad, 9.81 m/s²

Pérdidas de carga por cortante en la tubería de succión (h_{fs})

Las pérdidas por el efecto del esfuerzo cortante entre el flujo de agua y las paredes de la tubería de succión, se calcula mediante la expresión de Darcy-Weisbach, indicada en la ecuación E.5.

$$h_{fs} = f \frac{L_{ts}}{D_{ts}} \frac{V_{ts}^2}{2g} \quad (E.5)$$

Donde:

f = Es el coeficiente de cortante, determinado con la ecuación de Colebrook White, función del Número de Reynolds y de la rugosidad relativa

L_{ts} = Longitud de la tubería de succión, en metros

D_{ts} = Diámetro de la tubería de succión, en metros

V_{ts} = Es la velocidad del agua en la tubería de succión, en m/s

g = Es la aceleración de la gravedad, igual a 9.81 m/s²

Ejemplo numérico de evaluación de pérdidas y ahorro de energía eléctrica en un conductor eléctrico

Calcular las pérdidas en un conductor eléctrico que alimenta un motor de 150 Amperes, conectado a un equipo de bombeo sumergible. El calibre del conductor instalado es de 1/0 con 4 hilos a 440 Volts, como indica la NOM 001 ENER 2005. La distancia del cable es de 130 m. En la tabla E.2 se presenta la caída de voltaje (j) y la re-

sistencia R_c en Ohms ocasionada, para diferentes calibres de conductor con la distancia de 130 metros (0.13 km).

Tabla E.2 Resistencia para diferentes calibres de conductor y caída de voltaje para el ejemplo

Calibre	Resistencia			Δj	
	Ohms/km	Lc (km)	Ohms	Volts	%
1/0	0.3290	0.13	0.04277	6.42	1.46%
2/0	0.2610	0.13	0.03393	5.09	1.16%
3/0	0.2070	0.13	0.02691	4.04	0.92%
4/0	0.1640	0.13	0.02132	3.20	0.73%
250	0.1390	0.13	0.01807	2.71	0.62%
300	0.1157	0.13	0.01504	2.26	0.51%
350	0.0991	0.13	0.01288	1.93	0.44%
400	0.0867	0.13	0.01127	1.69	0.38%
500	0.0695	0.13	0.00904	1.36	0.31%
600	0.0578	0.13	0.00751	1.13	0.26%
750	0.0463	0.13	0.00602	0.90	0.21%

Al seleccionar el valor del calibre 1/0 en la tabla E.2, se obtiene que la caída de voltaje es de 6.42 volts (1.46%) y la resistencia de 0.4277 Ohms. Con estos datos se calculan las pérdidas energéticas, funcionando 6,000 horas al año y un Indicador de Costo Energético de 1.4 \$/kWh promedio (ver tabla E.3)

Tabla E.3 Calculo de pérdidas energéticas por efecto joule para el ejemplo

Parámetro	Valor
Tensión (V_j)	440 Volts
Corriente (I_c)	150 Amperes
Caída de tensión (Δj)	6.42 Volts
	1.46 %
Resistencia R_c (ecuación 4.12)	0.0428 Ohms
Pérdidas de energía eléctrica P_j (ecuación 4.11)	963 Watts
	0.963 kW
Horas de operación anual	6 000 horas/año
Pérdidas anuales de energía eléctrica	5 778 kWh/año
	8 089 \$/año

Si ahora se selecciona un calibre mayor, por ejemplo el conductor calibre 350, para las mismas 6 000 horas de operación, y se compara con el costo de energía con

el conductor original calibre 1/0, el ahorro de energía logrado es de el que se muestra en la tabla E.4.

Tabla E.4 Cálculo de ahorros por conductores eléctricos por comparación en el ejemplo

Parámetro	Valor que cumple con la norma	Valor que cumple con la norma y ahorra energía
Tensión (V_j)	440 Volts	440 Volts
Corriente (I_j)	150 Amperes	150 Amperes
Caída de tensión (Δ_j)	6.42 Volts	1.93 Volts
	1.46 %	0.44 %
Resistencia R_c (ecuación 4.12)	0.0428 Ohms	0.01287 Ohms
Pérdidas de energía eléctrica P_j (ecuación 4.11)	963 Watts	289.6 Watts
	0.963 kW	0.2896 kW
Horas de operación anual	6 000 horas/año	6 000 horas/año
Pérdidas anuales de energía eléctrica	5 778 kWh/año	1 737.6 kWh/año
	8 089 \$/año	2 432.6 \$/año
Ahorro de energía eléctrica	5 657 \$/año	

El último paso en la evaluación del conductor del ejemplo consiste en comparar el ahorro económico resultante con el costo del cambio de conductor para evaluar su rentabilidad.

En caso de que las pérdidas resulten de una magnitud importante durante el DEE, se recomienda aplicar el método de cálculo de equilibrio económico en función de la inversión mas rentable cuyo resultado típico se muestra en la figura E.6.

Evaluación de ahorros y beneficio-costo por sustitución de un motor estandar por alta eficiencia

Paso 1.- Calcular el costo anual de la energía consumida por el motor

- a) A partir del número de horas de operación al año del motor y de la potencia demandada por éste, se calcula la energía anual consumida por el motor, mediante la ecuación E.6.

$$EE_{cm} = P_e * hr_{op} \quad (E.6)$$

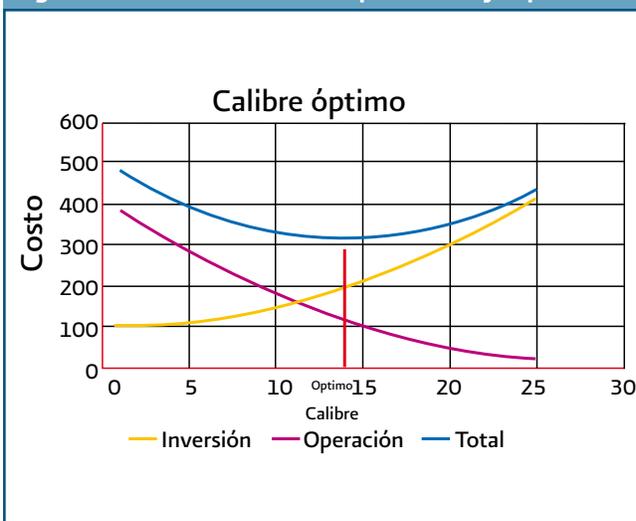
Donde:

- EE_{cm} = Energía consumida por el motor (kWh/año)
 P_e = Potencia eléctrica demandada (kW)
 hr_{op} = Número de horas de operación anual (h/año)

- b) A partir de la facturación por el servicio de suministro de energía eléctrica, para el sitio donde se encuentra el motor, calcular el costo unitario de energía en kWh mediante la ecuación E.7

$$CUE = \frac{\text{Importe total de la facturación}}{\text{Consumo total de energía}} \quad (E.7)$$

Figura E.6 Cálculo del calibre óptimo del ejemplo



- c) El costo anual de la energía consumida por el motor será:

$$\text{Costo energía anual} = EE_{cm} * CUE \quad (E.8)$$

Paso 2.- Proponer un motor nuevo de alta eficiencia

- a) Calcular la potencia mecánica entregada por el motor actual:

$$P_m = P_e * \eta_m \quad (E.9)$$

Donde:

P_m = Potencia mecánica entregada por el motor (kW)

P_e = Potencia eléctrica demandada (kW)

η_m = Eficiencia de operación del motor actual que se determina en la sección 4.1.2.1

- b) Calcular la potencia nominal teórica del motor, para que éste trabaje al 75% de su capacidad:

$$CP_{nt} = \frac{P_m}{0.75} \quad (E.10)$$

Donde:

CP_{nt} = Es la potencia nominal teórica (HP)

P_m = Es la potencia mecánica suministrada (kW)

0.746 = Es el factor de conversión de HP a kW

- c) Seleccionar al motor propuesto con la potencia comercial que más se acerque a la potencia nominal teórica, con el número de polos y voltaje nominal iguales al del motor actual.

- d) Cotizar el motor de alta eficiencia propuesto y solicitar al proveedor el valor nominal de la eficiencia.

Paso 3 .- Cálculo de los ahorros de energía por alcanzar.

- a) Calcular la potencia que demandará el motor propuesto:

$$P'_e = P_e * \frac{\eta_m}{\eta'_m} \quad (E.11)$$

Donde:

P'_e = Potencia eléctrica que demandará el motor propuesto (kW)

P_e = Potencia eléctrica demandada por el motor actual (kW)

η_m = Eficiencia de operación del motor actual

η'_m = Eficiencia de operación del motor propuesto

- b) Calcular la energía anual que consumiría el motor propuesto:

$$EE'_{mc} = P'_e * hr_{op} \quad (E.12)$$

Donde:

EE'_{mc} = Es la energía anual consumida por el motor propuesto (kWh/año)

P'_e = Es la potencia eléctrica demandada por el motor propuesto (kW)

hr_{op} = Es al número de horas de operación de motor (hr/año)

- c) Calcular los ahorros anuales que se obtendrán con el motor propuesto:

$$A\$ = (EE_{mc} - EE'_{mc}) * CUE \quad (E.13)$$

Donde:

$A\$$ = Es el ahorro económico anual que se obtendrá con la sustitución del motor actual (\$/año).

EE_{mc} = Es la energía anual que consume el motor actual (kwh/año)

EE'_{mc} = Es la energía anual que consumiría el motor propuesto (kWh/año)

CUE = Es el costo unitario de la energía (\$/kWh)

Evaluación de ahorros por sustitución del conjunto motor -bomba

Paso 1 .- Calcular el Costo Anual de la Energía Consumida por el Motor de la Bomba en operación.

A partir del número de horas de operación al año del equipo y de la potencia demandada por el motor, se calcula la energía anual consumida, mediante la ecuación E.12.

A partir de la facturación por el servicio de suministro de energía eléctrica, para el sitio donde se encuentra la bomba, calcular el costo integrado del kWh para cada

equipo en particular, mediante la E.7. El costo anual de energía se obtiene con la ecuación E.8.

Paso 2.- Proponer una nueva bomba que trabaje en la zona de máxima eficiencia y calcular las eficiencia electromecánica.

- Seleccionar el motor apropiado a la bomba seleccionada cuidando que el factor de carga este entre 75 y 85 % como máximo.
- Verificar la eficiencia del motor y de la bomba seleccionados
- Calcular la eficiencia electromecánica multiplicando las eficiencias de bomba y motor, por medio de la ecuación E.14.

$$\eta_{em} = \eta_b * \eta_m \quad (E.14)$$

Paso 3 .- Cálculo de los ahorros a obtenerse.

- Calcular la potencia eléctrica que demandará el conjunto propuesto:

$$P'_{mb} = \frac{P_h}{\eta_{em}} \quad (E.15)$$

Donde:

- P'_{mb} = Potencia eléctrica que demandará el motor con la bomba propuesta (kW)
- P_h = Potencia hidráulica basado en las condiciones de operación de diseño que demandará la bomba propuesta (kW)
- η_{em} = Eficiencia electromecánica del conjunto propuesto

- Calcular la energía anual que consumiría el conjunto propuesto:

$$EE'_{mb} = P'_{mb} * hr_{op} \quad (E.16)$$

Donde:

- EE'_{mb} = Energía anual consumida por el motor con la bomba propuesta (kWh/año)
- P'_{mb} = Potencia eléctrica que demandará el motor con la bomba propuesta (kW)

hr_{op} = Número de horas de operación anuales del equipo (h/año)

- Calcular los ahorros anuales que se obtendrán con el conjunto propuesto con la ecuación E.17.

$$A\$_{mb} = (EE_{mb} - EE'_{mb}) * CUE \quad (E.17)$$

Donde:

$A\$_{mb}$ = Ahorro económico anual que se obtendrá con la sustitución de la bomba y motor actuales (\$/año).

EE_{mb} = Energía anual que consume el motor con la bomba actual (kWh/año)

EE'_{mb} = Energía anual que consumiría el motor con la bomba propuesta (kWh/año)

CUE = Costo unitario de la energía (\$/kWh)

Una vez determinados los ahorros a lograrse con la implantación de la medida, estimar el monto de las inversiones necesarias para su aplicación y realizar la evaluación económica de rentabilidad

Evaluación de ahorros de energía eléctrica por optimización del factor de potencia

Paso 1 . Identificar los equipos que se encuentren con un valor por debajo del 92 % .

Estos valores se obtienen de la recopilación de información que se realiza al inicio del proyecto, específicamente del análisis de la facturación energética actualizada.

Los pasos dos al cuatro siguientes deben aplicarse a todos los equipos.

Paso 2. Calcular la capacidad del banco de capacitores a instalar.

- Cálculo de la energía reactiva consumida al mes

$$EE_r = \sqrt{\left(\frac{EE_a}{FP}\right)^2 - (EE_a)^2} \quad (E.18)$$

Donde:

EE_r = Energía reactiva promedio demandada al mes (kVArh)

EE_a = Energía activa promedio consumida al mes (kWh)
 FP = Factor de potencia promedio mensual

ii).- Cálculo la energía reactiva que se consumirá con la mejora del factor del potencia al 98%.

$$EE'_r = \sqrt{\left(\frac{EE_a}{0.98}\right)^2 - (EE_a)^2} \quad (E.19)$$

Donde:

EE'_r = Energía reactiva que se demandará con la mejora del factor de potencia a 98 % (kVArh/mes)

iii) Cálculo la energía reactiva EE_c (en kVArh), que se tendrá que producir con los capacitores.

$$EE_c = EE_r - EE'_r \quad (E.20)$$

iv) Cálculo de la capacidad del banco de capacitores

$$Cap_{bc} = \frac{EE_c}{hr_{op}} \quad (E.21)$$

Donde:

Cap_{bc} = Capacidad del banco de capacitores a proponer (kVAc)

hr_{op} = Número de horas promedio al mes que el sistema opera

v) Especificar la capacidad del banco de capacitores a instalar

Investigar entre los proveedores de bancos de capacitores, que banco comercial tiene una capacidad similar a la calculada en el punto anterior, y seleccionar dicha capacidad para el proyecto. Entonces, Cap es la capacidad del banco de capacitores a especificar.

Paso 3 .- Calcular el factor de potencia que se obtendrá con la instalación del banco de capacitores especificado.

i) Calcular la energía reactiva generada con el banco de capacitores especificado, EE'_c (en kVArh).

$$EE'_c = Cap * hr_{op} \quad (E.22)$$

ii) Calcular la energía reactiva que se demandará de la red, EE''_r (en kVArh), con el banco de capacitores especificado.

$$EE''_r = EE_r - EE'_c \quad (E.23)$$

iii) Calcular el factor de potencia que se obtendrá con la instalación del banco de capacitores especificado, FP' .

$$FP' = \frac{EE_a}{\sqrt{(EE_a)^2 + (EE''_r)^2}} \quad (E.24)$$

Paso 4.- Calcular el importe de los ahorros a lograr con la medida

i) Calcular el importe del cargo por bajo factor de potencia que se dejará de pagar.

$$\text{Si } FP > 0.9 \Rightarrow \Delta C_{fp} = 0.0 \quad (E.25)$$

$$\text{Si } FP < 0.9 \Rightarrow \Delta C_{fp} = \$F * \left(\frac{0.54 - 0.6 * FP}{0.54 + 0.4 * FP} \right) \quad (E.26)$$

Donde:

ΔC_{fp} = Importe del cargo por bajo factor de potencia (\$)

$\$F$ = Importe promedio de la facturación eléctrica (\$)

FP = Factor de potencia

ii) Calcular el importe de la bonificación actual (\$B_{fp}) por factor de potencia superior a 0.9.

$$\text{Si } FP < 0.9 \Rightarrow \Delta \$B_{fp} = 0.0 \quad (E.27)$$

$$\text{Si } FP > 0.9 \Rightarrow \Delta \$B_{fp} = \$F * \left(\frac{0.25*FP-0.225}{1.25*FP-0.225} \right) \quad (\text{E.28})$$

- iii) Calcular el importe de la bonificación que se obtendrá con la instalación del banco de capacitores especificado (B'fp).

$$\text{Si } \Delta B'_{fp} = \$F * \left(\frac{0.25*FP-0.225}{1.25*FP-0.225} \right) \quad (\text{E.29})$$

- iv) Calcular el importe de los ahorros a lograrse con la optimización del factor de potencia

$$\Delta \$A_{FP} = \Delta \$C_{fp} + \Delta \$B'_{fp} - \Delta \$B_{fp} \quad (\text{E.30})$$

Evaluación de ahorros por control de demanda en hora punta

Paso 1. Calcular la demanda facturable promedio actual, así como los consumos de energía promedio en punta, intermedio y pase.

A partir de la serie histórica de datos de facturación, como la mostrada en la tabla E.5.

Tabla E.5 Formato de serie histórica de datos de facturación

Periodo	Energía (kWh)			Demanda máxima (kW)		
	Punta	Intermedio	Base	Punta	Intermedio	Base
1						
2						
..						
..						
Promedio	EE _p	EE _i	EE _b	DEM _p	DEM _i	DEM _b

Calcular la demanda facturable promedio como:

$$DF = DEM_p + FRI * (\max(DEM_i - DEM_p), 0) + FRB * (\max(DEM_b - DEM_p), 0) \quad (\text{E.31})$$

Donde:

- DF = Demanda facturable promedio
 FRI = Factor de reducción en horario intermedio aplicable a la región tarifaria donde se encuentre el servicio del equipo de bombeo
 FRB = Factor de reducción en horario de base, aplicable a la región tarifaria donde se encuentre el servicio del equipo de bombeo

Paso 2. Determinar la carga de bombeo que se podrá parar en horario de punta, así como la que se tendrá que incrementar fuera del horario de punta y la demanda facturable.

Proponer una nueva forma de operación de los equipos, de manera tal que la carga de bombeo en horario de punta sea la menor posible. Para ello, apoyarse con la capacidad de regularización de los tanques.

Como resultado de este análisis, calcular la carga de bombeo que estará operando en cada uno de los horarios, así como el número de horas de operación al mes, de manera que se pueda calcular la energía que se consumirá en cada uno de los horarios, ver tabla E.6.

Tabla E.6 Formato de datos para el paro en hora punta de los equipos de bombeo

Energía (kWh)			Demanda máxima (kW)		
Punta	Intermedio	Base	Punta	Intermedio	Base
EE' _p	EE' _i	EE' _b	DEM' _p	DEM' _i	DEM' _b

Calcular la demanda facturable promedio con el paro en hora punta (DF') como:

$$DF' = DEM'_p + FRI * (\max(DEM'_i - DEM'_p), 0) + FRB * (\max(DEM'_b - DEM'_p), 0) \quad (\text{E.32})$$

Paso 3. Determinar los ahorros a obtener con la medida.

- Calcular el importe de la facturación actual:

$$F\$ = (DF * CDF) + (E_p * CEP) + (E_i * CEI) + (E_b * CEB) \quad (\text{E.33})$$

Donde:

- F\$ = Importe de la facturación actual
DF = Demanda facturable
 E_p = Energía de punta consumida en promedio al mes
 E_i = Energía intermedia consumida en promedio al mes
 E_b = Energía de base consumida en promedio al mes
CDF = Costo unitario de la demanda facturable según la región tarifaria
CEP = Costo unitario de la energía de punta según la región tarifaria
CEI = Costo unitario de la energía intermedia según la región tarifaria
CEB = Costo unitario de la energía de base según la región tarifaria

- Calcular el importe de la facturación esperado:

$$F\$' = (DF' * CDF) + (E_p' * CEP) + (E_i' * CEI) + (E_b' * CEB) \quad (E.34)$$

Donde:

- F\$' = Importe de la facturación esperada
DF' = Demanda facturable esperada
 E_p' = Energía de punta esperada al mes
 E_i' = Energía intermedia esperada al mes
 E_b' = Energía de base esperada al mes

- Calcular los ahorros económicos a lograrse, F\$.

$$\Delta F\$ = F\$ - F\$' \quad (E.35)$$

Bibliografía

- Arreguin Cortés F. y Ochoa Alejo L., 1997, "Evaluation of Water Losses in Distribution Networks", Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Sep-Oct, USA.
- Cabrera R. E. y Cabrera M. E., 2004, "Técnicas modernas de rehabilitación y renovación de tuberías, Evaluación y control de pérdidas en redes urbanas", Instituto Tecnológico del Agua, UPV, España.
- CONAGUA, 1993, "Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS)", Libro V.1. Datos Básicos, México.
- CONAGUA, 2008, "Programa de Seguimiento de Indicadores de Gestión para Cumplimiento de Meta de Eficiencia Global. Manual de Indicadores", Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, México.
- CONAGUA, 2007, "Sectorización en Redes de Agua Potable", Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, México.
- CONAGUA, 2007, "Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento", Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, México.
- Des Raj, 1992, "Teoría del Muestreo", Fondo de Cultura Económica, Segunda Edición, México.
- Helena Alegre, 1998, "Indicadores de gestión para abastecimientos de agua, tendencias actuales y proyectos de desarrollo", National Civil Engineering Laboratory, Lisboa Portugal, Gestión de Sequías en Abastecimientos Urbanos, Universidad de Politécnica de Valencia, Grupo de Mecánica de Fluidos, España.
- IMTA, 1999, "Estudio de rehabilitación de tuberías en Saltillo, Coahuila", IMTA, México.
- Martínez F., 2002, Epanet 2.0 en Español. Manual de Usuario. Departamento de Ingeniería Hidráulica, UPV. <http://www.idmh.upvs.es/manual/EN2manual.esp.pdf>
- NOM-001-ENER-2000: Eficiencia energética de bombas verticales tipo turbina con motor externo eléctrico vertical. <http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/4523/7/NOM001ENER2000.pdf>
- NOM-006-ENER-1995: Eficiencia energética electro-mecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación.- Límites y método de prueba. http://www.sener.gob.mx/webSener/res/Acerca_de/nom-006-ener-95.pdf
- NOM-010-ENER-2004: Eficiencia energética del conjunto motor-bomba sumergible tipo pozo profundo. Límites y métodos de prueba. <http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/4523/7/NOM010ENER2004.pdf>
- NOM-012-SCFI-1994: Medición de flujo de agua en conductos cerrados de sistemas hidráulicos-Medidores para agua potable fría-Especificaciones. <http://www.economia.gob.mx/work/normas/noms/1997/012-scfi.pdf>
- Comisión Federal de Electricidad <http://www.cfe.gob.mx>
- Ochoa L., 2005, "Planeación de acciones de incremento y control de la eficiencia en sistemas de agua potable", Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana, CONAGUA, México.
- Ochoa A.L. y Bourguett, O.V., 1998, "Reducción Integral de Pérdidas de Agua Potable", Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA, Jiutepec, Morelos, México.
- Ochoa Alejo L. y Reyes Medel L., 2008, "Generación y corrección de información para la conformación de balances de agua en sistemas de distribución de agua potable", Memorias del XX Congreso Nacional de Hidráulica, AMH, Toluca, México.
- Spiegel, 1991, "Estadística", Segunda edición, España.
- Wallace, 1987, "Water and Revenue Losses: Unaccounted for Water", AWWA, Research Report Foundation.

