



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE O TESIINA D'ESPECIALITAT

Títol

**CRITERIOS DE TRAZADO PARA LA INSERCIÓN
URBANA DEL TRANVÍA**

Autor/a

Helena ANDRÉS HILARIÓN

Tutor/a

Andrés LÓPEZ PITA

Departament

Infraestructura del Transport i del Territori (ITT)

Intensificació

Ferrocarrils urbans

Data

Juny 2010

RESUMEN

Título: Criterios de trazado para la inserción urbana del tranvía

Autor/a: Helena Andrés Hilarión

Tutor: Andrés López Pita

En los últimos tiempos, el tranvía moderno se ha implantado en numerosas zonas urbanas, tras un proceso de modernización que le ha aportado múltiples ventajas.

Sin embargo, en la actualidad no se dispone de un conjunto integrado de criterios debidamente justificados para el diseño del trazado de la vía. La literatura existente al respecto no es profusa y las recomendaciones no suelen coincidir. En la práctica se ha recurrido a la experiencia previa y a criterios acomodaticios del ferrocarril convencional. Como se sabe, el tranvía tiene unas características intrínsecas claramente diferenciadas.

Se hace necesaria la definición de un marco de referencia integrador que oriente la concepción del trazado de la vía en sistemas tranviarios.

A través de la definición de los criterios de trazado se busca maximizar la calidad de explotación del sistema en términos de velocidad, mantenimiento y confort; adaptarse a las prestaciones técnicas ofrecidas por el material móvil y la infraestructura; y compatibilizar el trazado con la geometría existente. Los criterios permiten acotar el rango de valores que deberían adoptar los parámetros de trazado.

En la medida de lo posible, se debe evitar el uso de valores límite. No obstante, las restricciones urbanas influirán en las posibilidades reales de implantación. La elección de cualquier de magnitud suele ser el resultado de un compromiso entre lo deseable y lo posible.

Mediante la revisión documental, las recomendaciones de profesionales del sector y la revisión de proyectos existentes, se seleccionarán los criterios para la concepción del trazado que tengan en cuenta las características de los sistemas tranviarios y las restricciones de inserción en la trama urbana.

El principal propósito de la tesina es definir un marco de referencia que resulte útil en el proceso de análisis de la viabilidad de un corredor tranviario, y por lo tanto, pueda servir de ayuda en el proceso de toma de decisiones.

ABSTRACT

Title: Track geometry criteria for the tramway urban insertion

Author: Helena Andrés Hilarión

Tutor: Andrés López Pita

Over the last few years the modern tramway has been introduced in many urban areas after a process of modernization which has brought multiple advantages.

However, at the present time, there is not a set of combined criteria properly supported with regard to the design of the track geometry. There is a shortage of literature on this matter and the recommendations are often discordant. In practice, those responsible for the design of geometry have turned to previous experience and adjusted criteria from the conventional railway. As a matter of fact, the inherent traits of the tram are clearly different.

This way, it is becoming necessary a definition of a combined reference framework in order to give guidance about the concept of the track geometry in tram systems.

The definition of track geometry criteria is intended to maximize the operating system quality in terms of speed, maintenance and comfort; to adapt to the performance qualities of the rolling stock and infrastructure; and to harmonize the track geometry with the existing geometry. The criteria make it possible to limit the range of values which the alignment components can adopt.

As far as possible, limit values should be avoided. Nonetheless, urban restrictions will have an effect on the real possibilities of the insertion. It is known that the choice of any output tends to lie between what is desirable and possible.

The specific criteria for the conception of the track geometry and the restrictions of the insertion in urban structure will be gathered by taking into consideration the existing literature, the recommendations of specialized professionals and the review of current projects.

The main objective of this minor thesis is to define a reference framework which could turn out to be useful in the process of the feasibility analysis of an alignment corridor and thus, be helpful in the decision-making process.

ÍNDICE

1 . INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1. Razón de ser	1
1.1.1. El tranvía, un sistema de transporte renovado.....	1
1.1.2. Recomendaciones específicas de trazado.....	3
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Metodología.....	5
2 . PROYECTO DE LOS SISTEMAS TRANVIARIOS	9
2.1. Puntos clave	9
3 . CONCEPCIÓN DEL TRAZADO DE LA VÍA.....	11
3.1. Introducción	11
3.2. Trazado en planta.....	11
3.2.1. Generalidades.....	11
3.2.2. Alineaciones rectas	12
3.2.3. Alineaciones circulares.....	14
3.2.4. Peralte.....	19
3.2.5. Curvas de transición.....	24
3.3. Trazado en alzado	28
3.3.1. Generalidades.....	28
3.3.2. Inclinación de la rasante.....	29
3.3.3. Acuerdos verticales	30
3.4. Perfil transversal	33
3.4.1. Generalidades	33
3.4.2. Gálibo del material móvil	34
3.4.3. Gálibo límite obstáculos y entrevía.....	35
3.5. Particularidades.....	40
3.5.1. Combinación del trazado en planta y alzado.....	40
3.5.2. Condicionantes vinculados a las estaciones	40
3.5.3. Condicionantes vinculados a cocheras y vías de maniobra	43
3.5.4. Condicionantes vinculados los aparatos de vía.....	43
3.6. Resumen de los principales criterios de trazado	45

4 . INSERCIÓN URBANA DEL TRANVÍA.....	47
4.1. El espacio público.....	47
4.1.1. Inserción urbana del tranvía.....	47
4.1.2. Usos de la vía	48
4.1.3. Usuarios de la vía.....	49
4.2. Inserción de la plataforma en la vía pública.....	50
4.2.1. Grado de segregación.....	50
4.2.2. Posición de la plataforma	54
4.2.3. Tipos de separación.....	55
4.2.4. Acabado de la superficie	57
4.3. Interacción con otros usuarios de la vía	59
4.3.1. Cruces de peatones	59
4.3.2. Intersecciones	64
4.4. Paradas y estaciones	69
4.4.1. Ubicación y tipologías	70
4.4.2. Características básicas	71
4.5. Secciones tipo	73
5 . CONCLUSIONES	77
6 . REFERENCIAS	79
ANEJO 1: Tranvías modernos en circulación en España	81
ANEJO 2: Parámetros de trazado utilizados en ciudades europeas.....	82
ANEJO 3: Geometría y funcionamiento de determinadas intersecciones.....	83

1 . INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. RAZÓN DE SER

1.1.1. El tranvía, un sistema de transporte renovado

El tranvía llegó a predominar en el transporte urbano antes de ser suplantado por el automóvil. Tras un proceso de modernización iniciado hace unos 20 años, el tranvía está en auge y vuelve progresivamente a las calles revolucionando la movilidad urbana.

Su modernización reside principalmente en la disminución de interferencias provocadas por el resto del tráfico. La solución se consigue mediante el uso de plataforma reservada en la mayor parte del recorrido, siendo ésta la principal característica de los actuales sistemas de tranvía moderno en oposición a los antiguos tranvías.

Un poco de historia

El tranvía nace en Estados Unidos en 1852. Las primeras redes de tranvía a tracción eléctrica aparecen en Alemania a partir de 1881 y se extienden por ciudades de todo el mundo. Esa primera generación conoció su apogeo entre las dos guerras mundiales. Después de este periodo, se desarrolla el uso generalizado del automóvil y del bus, que ocupan la vía pública dificultando la circulación del tranvía. Disminuye su velocidad comercial afectando la calidad ofrecida a la vez que desciende significativamente el número de viajeros.

En muchas ciudades se opta por el desmantelamiento de las redes tranviarias. La vía pública se ajusta a los nuevos protagonistas de la movilidad urbana: el automóvil y, de forma secundaria, el bus. Destacar que en numerosas ciudades de países como Holanda, Alemania, Suiza, etc., no llegó a desaparecer.

Este modelo de movilidad urbana se ve abocado al fracaso en vista del uso indiscriminado del vehículo particular y del crecimiento de las ciudades. Los problemas rápidamente se hacen patentes: la congestión que incrementa los tiempos de desplazamiento, la contaminación, la falta de espacios para el peatón,... Esto viene acompañado por la ausencia de una oferta de transporte público de calidad.

Se hace necesaria una reflexión profunda sobre la movilidad urbana y los usos del espacio público. En este contexto, el tranvía se presenta como una oportunidad de cambio. A partir de 1985 se inicia en Francia el establecimiento de nuevas redes tranviarias y se extiende por el resto de Europa. También se renuevan y prolongan las líneas ya existentes.

Ventajas del tranvía moderno

Entre las ventajas que puede ofrecer el tranvía moderno destacan las que a continuación se mencionan:

- Servicio accesible, fiable y cómodo
- Bajos niveles de accidentalidad viaria
- Mayor velocidad comercial y capacidad que los buses
- Contribución a la mejora de la movilidad urbana
- En comparación con el metro, costes inferiores y plazos de implantación reducidos
- Eficiencia energética y menor impacto ambiental
- Flexible: urbano-interurbano, superficie-túnel-viaducto, zonas peatonales
- Instrumento de renovación urbanística

Estado actual de las redes tranviarias

Las redes de tranvías modernos se van extendiendo progresivamente por toda la geografía. Se pueden encontrar tanto en grandes ciudades como en poblaciones intermedias.

Europa presenta el mayor número de líneas de este modo de transporte. De todas formas, tanto Estados Unidos como Asia y Oriente Medio muestran una tendencia activa en la implantación de nuevos sistemas.

Los datos más recientes sobre las redes tranviarias en Europa han sido recogidos por Salmerón (2009). Se pueden encontrar sistemas antiguos y modernos de tranvía en 284 ciudades del continente europeo sumando unos 11617 km de longitud. Los países que cuentan con mayor número son Alemania y Rusia. Respecto al tranvía moderno, se han establecido nuevas líneas en unas 70 ciudades desde la primera abierta en Nantes en 1985.

España, a día de hoy, cuenta con tranvías modernos en circulación en muchas de sus ciudades. En el Anejo 1 se muestra una tabla con información al respecto. También cuenta con un número importante de proyectos en fase de estudio o ejecución, consolidándose de esta manera la presencia del tranvía moderno en el territorio.

1.1.2. Recomendaciones específicas de trazado

La literatura sobre el trazado de la vía en sistemas tranviarios no es particularmente abundante. Cabe destacar que la documentación correspondiente ha sido publicada en la última década; con anterioridad a este periodo, la información es escasa. La mayor parte de la información existente en la actualidad está constituida por una serie de recomendaciones mencionadas en guías que cubren diversos temas relacionados con los modos de transporte colectivo en superficie; las recomendaciones de trazado no suelen coincidir entre ellas. No se evidencian estudios exhaustivos específicos de tranvías sobre los parámetros relativos a la concepción del trazado de la vía.

Esta situación contrasta con la que se da en el ferrocarril convencional, en la que se dispone de mayor información y también de normativas específicas. A título indicativo, en el ámbito europeo, se dispone de la siguiente reglamentación: la UNE ENV 13803 -1 "Parámetros de proyecto del trazado de la vía. Ancho de vía de 1435 mm y mayores. Parte 1: Plena vía". Además, a nivel nacional, muchos países cuentan con recomendaciones propias.

En la actualidad, no se dispone de un conjunto integrado de criterios debidamente justificados para el diseño del trazado de la vía en los sistemas tranviarios. Cabe entonces preguntarse cómo se ha efectuado el diseño de las líneas de tranvía construidas hasta este momento. La respuesta es sencilla: aprovechando las pocas recomendaciones disponibles, adaptando los criterios derivados del ferrocarril convencional y principalmente recurriendo a la experiencia previa. En vista de los resultados favorables que están dando los diversos sistemas tranviarios implantados, estaríamos tentados a concluir que el establecimiento de un marco de referencia específico para tranvías no es necesario.

No obstante, hay argumentos que nos exigen determinar un marco de referencia integrador que oriente la concepción del trazado de la vía en sistemas tranviarios de cara al desarrollo de futuras aplicaciones.

En primer lugar, existen deficiencias en algunos tramos de redes tranviarias existentes. Este marco representa una oportunidad de mejora de la calidad de explotación del sistema. Los temas sobre los que se puede incidir mediante los criterios que constituirían el marco de referencia mencionado son básicamente:

- Aumentar el confort percibido por el viajero.
- Reducir los puntos que restringen la velocidad de circulación.
- Conseguir una mejor conservación del material móvil y de la infraestructura.

El aumento del confort permite dotar al tranvía de un carácter más atractivo y poder así constituirlo como una alternativa competitiva al vehículo particular. Aunque lo que más atrae al viajero es el aumento de la velocidad comercial: disminuye los tiempos de recorrido y con la

misma flota de vehículos se puede ofrecer una frecuencia mayor. Otro efecto positivo del aumento de la velocidad es que para el mismo servicio se requiere un número inferior de vehículos, lo cual representa una disminución de costes de explotación. La mejor conservación permite a su vez disminuir los costes de mantenimiento y, por ende, los costes de explotación.

Otro argumento de gran peso es que se han utilizado criterios acomodaticios del ferrocarril convencional. El tranvía tiene unas características intrínsecas claramente diferenciadas en cuanto a material móvil, explotación del sistema, inserción en el territorio, etc.

El marco de referencia en cuestión no tiene un carácter normativo sino orientativo. La principal razón reside en el hecho de que si fuese normativo, tocaría descartar la implantación de tranvías en muchas zonas urbanas.

En cada caso, la solución se debe adaptar a las restricciones y exigencias locales. En este sentido está dirigido el capítulo 4 de la presente tesina.

1.2. OBJETIVOS

La presente tesina tiene como objetivo general la recopilación de criterios para la concepción del trazado que tengan en cuenta las características propias de los sistemas tranviarios y su inserción en la trama urbana.

La consecución del objetivo general se hará a través de los siguientes objetivos específicos:

- Resumir los puntos clave de un proyecto tranviario.
- Revisar las recomendaciones y valores utilizados en las redes tranviarias existentes en relación al trazado de la vía.
- Presentar la teoría básica y las expresiones resultantes que permitan caracterizar los diferentes parámetros asociados a la concepción del trazado de la vía.
- Analizar la relación entre los parámetros de trazado y la explotación del sistema prestando especial atención a la velocidad comercial, las condiciones de confort del viajero y el mantenimiento del material móvil y la infraestructura.
- Identificar las diferentes restricciones que condicionan el trazado de la vía y deducir los valores límite de los parámetros de trazado. Comparar con los valores utilizados en la realidad.

- Estudiar las diferentes formas de inserción urbana de una red tranviaria cubriendo los aspectos relacionados con la plataforma, las intersecciones, las estaciones, etc. Destacar su papel en la movilidad urbana.

Los propósitos que se pretenden alcanzar mediante la realización de esta tesina son dos. Primero de todo, se busca presentar un marco de referencia que proporcione criterios específicos para la concepción del trazado en sistemas tranviarios adecuados al contexto real. Este marco, juntamente con el estudio de las restricciones de inserción urbana, resulta útil en el análisis de la viabilidad de un corredor tranviario, y por lo tanto, servir de ayuda en el proceso de toma de decisiones.

En segundo lugar, identificar las oportunidades de mejora y una vez agotadas las posibilidades de este enfoque ayudar a orientar futuras líneas de investigación en otros ámbitos como el del material móvil.

1.3. METODOLOGÍA

Se analiza con rigor la información relativa a los sistemas tranviarios proveniente de diversas fuentes. Éstas incluyen: revisión documental, recomendaciones de profesionales del sector y revisión de proyectos existentes. Dentro de la metodología de la investigación se puede considerar un estudio de tipo descriptivo.

Para la propuesta de criterios de trazado se ha revisado en profundidad los documentos indicados en el cuadro 1.1.

Cuadro 1.1 Fuentes documentales sobre recomendaciones de trazado.

Organismo	Documento	Capítulos
CERTU	<i>Guide d'aménagement de voirie pour les transports collectifs.</i> (2000)	L'insertion géométrique et cinématique des matériels roulants.
TCRP	<i>TCRP Report 57. Track design handbook for Light Rail Transit.</i> (2000)	Light Rail Transit Track Geometry. Special Trackwork.
CRTM	<i>Manual de tranvías, metros ligeros y sistemas en plataforma reservada.</i> (2006)	Proyecto e implantación de sistemas en plataforma reservada.
UITP	<i>Guidelines for Selecting and Planning a New Light Rail System.</i> (2003)	Insertion of LRT alignment and infrastructure in cities. Typical Light Rail System Parameters

A lo largo del capítulo 3 las referencias bibliográficas a los documentos indicados en el cuadro 1.1 serán citadas únicamente con el nombre del organismo.

El CERTU es el *Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques*. Es un servicio técnico que depende del ministerio francés de Ecología, Energía, Desarrollo sostenible y Urbanismo del territorio. Su misión es hacer progresar el conocimiento y las buenas prácticas en las diferentes áreas del urbanismo. La *Guide d'aménagement de voirie pour les transports collectifs* trata sobre la urbanización de las vías con presencia de transporte público, de bus en plataforma reservada y de tranvía en plataforma reservada o no.

El TCRP es el *Transit Cooperative Research Program* auspiciado por la Federal Transit Administration de Estado Unidos. Bajo este programa se promueve el desarrollo de soluciones innovadoras a problemas de explotación en el transporte. También se intenta dar respuesta a las necesidades de los sistemas de transporte público mediante la utilización adecuada de las nuevas tecnologías. Este programa de investigación aborda temas relacionados con la planificación, infraestructura, seguridad, entre otros. El *TCRP Report 57* es una guía que aborda toda la información práctica sobre los sistemas ferroviarios urbanos e interurbanos de vehículos ligeros tanto los que circulan sobre vías en balasto y en placa con o sin carril embebido. Cabe destacar, que es la guía que trata con mayor detalle estos temas aunque lo hace en general para vehículos que circulan a mayor velocidad que los tranvías urbanos.

El *Manual de tranvías, metros ligeros y sistemas en plataforma reservada* es el fruto de un convenio entre el Consorcio Regional de Transportes de Madrid y la Universidad Politécnica de Madrid. El manual se plantea como una guía metodológica de buenas prácticas para los gestores de la ciudad y los estudios universitarios en materia de transporte, urbanismo e ingeniería municipal. Uno de los aspectos en los que incide es el estudio de la implantación del transporte en el espacio público de la ciudad. Cubre los temas relacionados con los tranvías modernos y también los autobuses.

La UITP es la Unión Internacional del Transporte Público. Es el organismo internacional que integra los aspectos relacionados con el transporte público y pone en común el trabajo de las autoridades y operadores del transporte, los centros de conocimiento y la industria del transporte público. Las *Guidelines for Selecting and Planning a New Light Rail System* ofrecen un compendio de información dirigida a ayudar a nuevos proyectos de tranvía moderno. Aborda con detalle una gran variedad de tópicos e incluye casos prácticos.

Los criterios utilizados para la selección de estas fuentes de información han sido: la relevancia de los organismos mencionados, la variedad de orígenes geográficos y la vigencia de los documentos.

La presente tesina tiene por objeto los tranvías modernos en plataforma reservada o compartida. Se analiza de forma detallada las recomendaciones explicitadas sobre trazado de la vía mediante su valoración, comparación entre ellas y contraste con la praxis profesional. Posteriormente se exponen y se acompañan de los comentarios correspondientes sobre su pertinencia, aplicación y limitaciones. La finalidad es presentar una visión integrada y justificada de las diferentes posibilidades existentes en relación a la concepción del trazado.

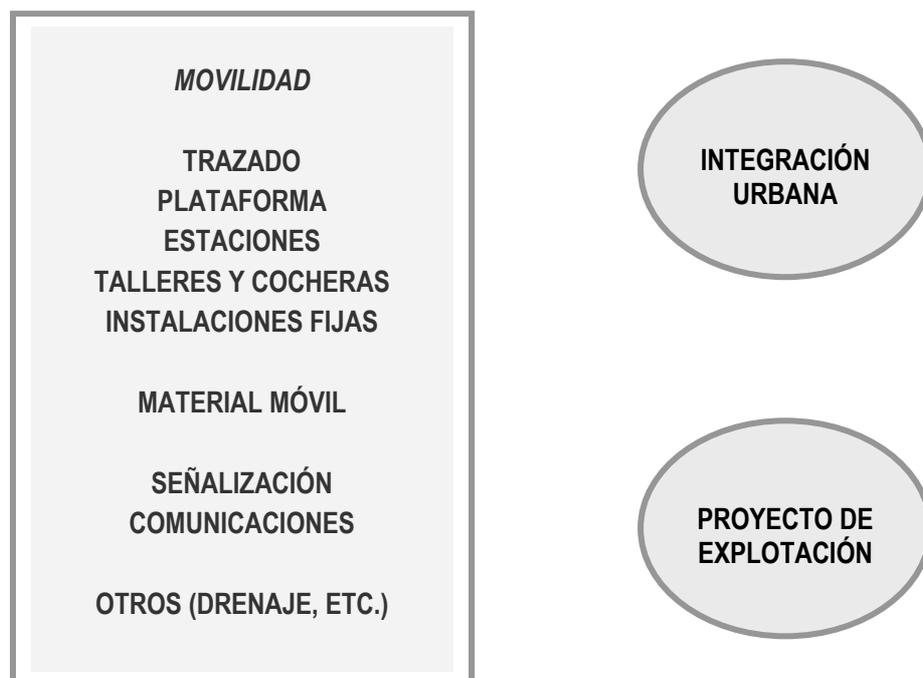
Una vez revisada la información correspondiente al trazado, presentada en el capítulo 3, se procede al estudio de las restricciones derivadas de la inserción urbana del tranvía en el capítulo 4. Se sigue un proceso metodológico similar al anterior. Ambos capítulos se complementan con diversa documentación gráfica.

2 . PROYECTO DE LOS SISTEMAS TRANVIARIOS

2.1. PUNTOS CLAVE

El proyecto de un sistema tranviario consta de diversas partes interrelacionadas entre sí y sobre las que inciden la integración urbana y el proyecto de explotación.

El siguiente esquema pretende mostrar los principales elementos, excepto los relacionados con gestión y financiación, que conforman un proyecto de tranvía.



En una primera fase de planificación se evalúan las necesidades de **movilidad** de la zona de influencia con el fin de identificar corredores. Posteriormente se debe evaluar la idoneidad de cada uno de los corredores, es decir, hacer un estudio de alternativas. Se debe analizar las características de **explotación** ofrecidas por cada uno de las opciones y las posibilidades de **inserción urbana**, sin olvidar los **criterios económicos**. Para ello es necesario definir los aspectos restantes del cuadro superior.

3 . CONCEPCIÓN DEL TRAZADO DE LA VÍA

3.1. INTRODUCCIÓN

Entendemos por trazado de la vía la definición geométrica de la misma. Constituye el eje que da apoyo a la trayectoria de los vehículos. En este capítulo se pretende definir las hipótesis de concepción del trazado de la vía y las limitaciones asociadas a los diferentes parámetros.

Se aborda la definición geométrica de la vía en planta, en alzado y su combinación, además de la sección transversal. Se presentan asimismo las particularidades ligadas a las estaciones, cocheras, aparatos de vía y combinación de planta con alzado.

Los objetivos en el establecimiento del trazado en un sistema ferroviario de transporte de viajeros son:

- Maximizar la calidad de explotación del sistema: velocidad, mantenimiento, confort.
- Adaptarse a las prestaciones técnicas ofrecidas por el material móvil y la infraestructura.
- Compatibilizar el trazado con la geometría del territorio.

El tranvía tiene estos y muchos otros puntos en común con el ferrocarril convencional. Sin embargo, las particularidades de cada sistema conducen al establecimiento de criterios de trazado diferenciados. La singularidad del tranvía reside en su mayor nivel de integración en el entorno urbano, las velocidades inferiores de circulación, el uso de material móvil ligero, entre otros.

3.2. TRAZADO EN PLANTA

3.2.1. Generalidades

El trazado en planta está constituido por una serie de alineaciones rectas y circulares, unidas mediante curvas de transición.

Su definición está sujeta a una serie de condicionantes: la geometría del entorno, las prestaciones del material móvil y las condiciones de seguridad. Una vez resueltas estas exigencias, el trazado debe maximizar la calidad de explotación del sistema; se persigue conseguir velocidades de circulación suficientes, una conservación de la infraestructura asumible, y, en la medida de lo posible, garantizar niveles de confort aceptables, y todo ello a un coste razonable.

Es importante destacar que condiciones de confort muy exigentes representan una situación ideal, siendo necesario en la mayoría de las veces aceptar un nivel de confort inferior.

Un aspecto más a tener en cuenta es el hecho de que en los sistemas tranviarios implantados en entornos urbanos las condiciones de seguridad son menos limitativas que en el ferrocarril convencional.

3.2.2. Alineaciones rectas

Como en todo ferrocarril, y en esto no se diferencia de otros sistemas guiados sobre carriles, la alineación recta es la predominante y es la que debe ser privilegiada.

La recta proporciona la trayectoria óptima. Obviamente se trata de una situación ideal ya que el trazado debe ser compatible con la configuración del espacio urbano. Pero aún en circunstancias locales restrictivas, se debe asegurar un mínimo de calidad.

En este sentido, se indican las siguientes recomendaciones.

Longitud mínima entre curvas

La cuestión que se plantea es establecer longitudes mínimas de las alineaciones rectas entre curvas con el objetivo de reducir el vaivén. El criterio a adoptar depende de las características del vehículo y del nivel de confort que se desee alcanzar.

Si se desea estudiar con detalle la longitud de un segmento recto entre curvas, se han de tomar en consideración las curvas de transición. En curvas en S, las opciones que se presentan son las señaladas en la figura 3.1.

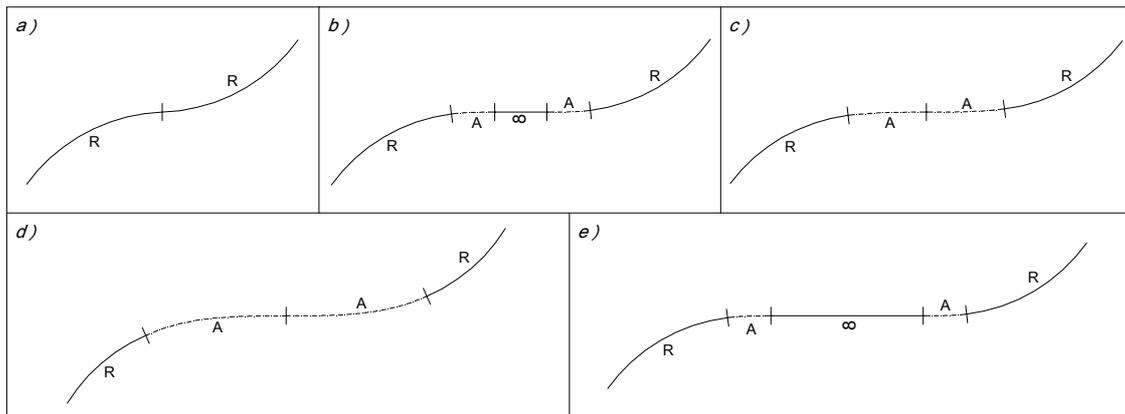


Figura 3.1 Alineación recta entre curvas en S.

Las diferentes opciones están ordenadas de forma que la (a) es la menos favorable y la (e) la más favorable. En la disposición más favorable se usan curvas de transición y el segmento recto tiene una longitud mayor o igual a la del vehículo.

A nivel de confort, las opciones (d) y (e) son equivalentes. La explicación de por qué la opción (e) es mejor que la (d) reside en el efecto de los sobreeanchos que se presentan al circular en curva (ver apartado 3.4.2). En una curva dada, es relativamente fácil prever el movimiento que hará el vehículo. Pero en una curva en S, como la de la foto 3.1, el comportamiento del vehículo es más incierto.



Foto 3.1 Curva en S en la que el movimiento del vehículo es más incierto, Montpellier. (Autor: F. Carrasco)

La guía del TCRP aborda ampliamente este tema y expone las siguientes reflexiones:

- Si la geometría lo permite, un criterio es la longitud del vehículo, en condiciones normales de explotación.

- De cara al confort, un criterio es la longitud dada por $L(m) = 0,57 \cdot V(\text{km/h})$, donde la fórmula se basa en un vehículo circulando al menos 2 segundos por tramo recto.
- En la mayor parte de los casos, es difícil disponer de suficiente espacio para establecer estas longitudes. Cuando la geometría es muy estricta proponen:
 - 1) Para curvas en S: un criterio es la distancia entre bogies, que suele ser de 10 a 15 metros; si no es posible establecer esta distancia, una solución límite es reducir a cero el tramo recto entre curvas, siempre que la velocidad sea inferior a 20 km/h y no se utilice peralte.
 - 2) Para curvas del mismo sentido: es preferible que la longitud del tramo recto entre ellas sea igual a cero.

3.2.3. Alineaciones circulares

Efectos circulación en curva

Un vehículo al recorrer una trayectoria circular de radio R a una velocidad V , experimenta una aceleración perpendicular a su trayectoria $\Gamma = V^2/R$, quedando sometido a una fuerza centrífuga de valor:

$$F_c = \frac{P}{g} \cdot \frac{V^2}{R} \quad (3.1)$$

Esta fuerza es función de la masa del vehículo, de la velocidad de circulación y del radio de la curva. Tiende a desviar el vehículo hacia el exterior de la curva creando efectos desfavorables. Disminuye el confort percibido por el pasajero, produce un mayor desgaste del el material móvil y la vía, y afecta a la seguridad en el caso de velocidades elevadas. En vista de las velocidades reducidas que desarrolla el tranvía, la fuerza centrífuga tiene poca repercusión en la seguridad.

Con el objetivo de limitar este fenómeno se pueden plantear las siguientes medidas:

1. Modificar el esquema de fuerzas: elevar el carril exterior respecto al interior para contrarrestar la fuerza centrífuga, es decir, introducir un peralte.
2. Aumentar la longitud de la curva de transición; no anula el fenómeno, pero sí disminuye la sensación de incomodidad.
3. Reducir la velocidad.

En el caso de sistemas tranviarios, el uso de grandes radios es prácticamente incompatible con el espacio disponible en zona urbana y su geometría. La medida de reducir la velocidad afecta negativamente a la explotación de la línea, aunque en muchos casos es la única solución. En relación con el uso de peralte, su implantación no siempre es posible o recomendable, tal y como se comentará posteriormente.

Justificación de peralte

La utilización de peralte permite compensar toda o una parte de la fuerza centrífuga que actúa al circular en curva. Se obtiene elevando un carril respecto al otro.

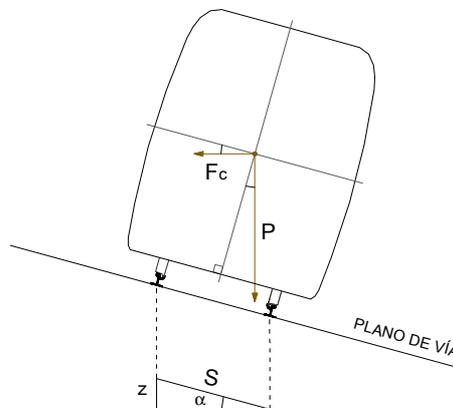


Figura 3.2 Esquema de fuerzas actuantes sobre el vehículo en curva.

Veamos cuál es la fuerza resultante en el plano de vía (F_{PV}). De la geometría de la figura 3.2 y de la expresión 3.1, se deduce:

$$F_{PV} = F_C \cdot \cos \alpha - P \cdot \operatorname{sen} \alpha = \frac{P}{g} \cdot \frac{V^2}{R} \cos \alpha - P \frac{z}{S}$$

donde S = distancia entre ejes de carriles
 α = ángulo del plano de vía respecto a la horizontal
 z = peralte
 P = peso del vehículo
 F_C = fuerza centrífuga

Tal y como se justificará posteriormente, se puede suponer que el ángulo α presenta valores pequeños y por lo tanto $\cos \alpha \approx 1$.

La expresión anterior queda como: $F_{PV} = \frac{P V^2}{g R} - P \frac{z}{S}$.

y puesto que $F_{pV} = \frac{P}{g} \cdot \Gamma_{sc}$, resulta:

$$\Gamma_{sc} = \frac{V^2}{R} - \frac{g}{S} \cdot z \quad (3.2)$$

Esta aceleración, (Γ_{sc}), se denomina aceleración transversal no compensada por el peralte. El peralte que anula esta aceleración y por tanto compensa toda la fuerza centrífuga, se denomina peralte teórico (z_t):

$$z_t = \frac{S}{g} \cdot \frac{V^2}{R}$$

El peralte se puede expresar de dos formas:

- Sobreelevación z en [mm]
- Inclinación transversal α en [%]

La segunda forma, a diferencia de la primera, es independiente del ancho de vía. Se relacionan fácilmente mediante la expresión $z(\text{mm}) = \alpha(\%) \cdot S(\text{mm}) \cdot 0,01$.

Valores permisibles de la aceleración transversal

Uno de los aspectos a tener en cuenta en la evaluación del confort de un viajero es el nivel de vibraciones a que se encuentra sometido. El nivel de vibraciones se puede caracterizar a partir de las aceleraciones que experimenta el viajero.

Las aceleraciones se pueden desglosar en el sentido longitudinal, transversal y vertical, siendo la transversal la que generalmente ocasiona mayor incomodidad al pasajero. En este apartado se estudia el límite de la aceleración transversal percibida por el pasajero que permita garantizar un nivel de confort razonable.

Aceleración percibida por el viajero

Como se ha indicado anteriormente, en curva aparece la acción de la fuerza centrífuga produciendo una aceleración transversal. El uso de peralte permite contrarrestar este fenómeno, siendo la aceleración no compensada la que afectará el confort del viajero. Esta aceleración está referida al plano de vía. Para obtener la aceleración en el plano del viajero, se debe tener en cuenta el efecto de las suspensiones del vehículo.

La caja del vehículo se inclina hacia el exterior de la curva por el efecto de la fuerza centrífuga, de forma que la aceleración percibida por el viajero es mayor que la existente en el plano de vía. Este hecho se tiene en cuenta mediante el coeficiente de flexibilidad o de souplesse (θ) del vehículo. La aceleración transversal percibida por el viajero debido a la acción de la fuerza centrífuga se expresa en la forma:

$$\Gamma_{viajero} = \Gamma_{sc} (1 + \theta)$$

Flexibilidad de las suspensiones

El coeficiente de flexibilidad de un vehículo se define como:

$$\theta = \frac{\eta}{\alpha}$$

Donde α el ángulo entre el plano de vía y la horizontal, y η el ángulo entre el eje del vehículo y la perpendicular al plano de vía.

Es importante señalar que, en el cálculo de las aceleraciones transversales, el efecto de las suspensiones en vehículos tranviarios no es tan significativo como en los vehículos de ferrocarril convencional debido a su velocidad de circulación inferior. Es un efecto que sí que tendrá importancia en el cálculo de los gálibos.

Cabe preguntarse si se produce algún otro tipo de aceleración sobre el viajero. Efectivamente, a la aceleración debida a la fuerza centrífuga hay que añadir la debida a la existencia de defectos en la geometría de la vía. Siguiendo a López Pita (2006), la aceleración transversal que actúa sobre un viajero durante la circulación del vehículo en curva se puede expresar como:

$$\Gamma_{total-viajero} = \Gamma_{sc} (1 + \theta) + \Gamma_{defectos}$$

En la bibliografía consultada relativa a tranvías, prácticamente no se menciona la aceleración provocada por los defectos de la vía. Es un efecto que existe, ya que de lo contrario, se deduce que en los tramos rectos no se experimentan aceleraciones transversales y la experiencia pone de manifiesto lo contrario. Sin embargo, su aplicación práctica en el estudio del trazado en planta tiene un menor interés que en el ámbito del ferrocarril convencional, debido a su velocidad inferior.

Cabe destacar que la magnitud de las oscilaciones que experimenta un vehículo al circular por una vía con cierto nivel de defectos depende en gran medida de su velocidad.

Valores recomendados

Los valores indicados en la bibliografía consultada se presentan en el cuadro 3.1.

Cuadro 3.1 Valores recomendados de la aceleración transversal máxima.

Fuente	Parámetro	Valor normal	Valor límite
CERTU	Aceleración transversal	0,68 m/s ²	1 m/s ²
TCRP	Aceleración transversal		1 m/s ²
CRTM	Aceleración transversal	0,65 – 0,70 m/s ²	1 m/s ²

Estas aceleraciones están referidas al plano de vía (Γ_{sc}); no se tiene en cuenta el efecto de las suspensiones del vehículo ni los defectos la vía.

Los valores recomendados de la aceleración total sobre el viajero, derivados de la experiencia francesa, están recogidos en el cuadro 3.2.

Cuadro 3.2 Valores recomendados de la aceleración total sobre el viajero.

Nivel de comodidad	Sentado (m/s ²)	De pie (m/s ²)
Muy bueno	1,0	0,85
Bueno	1,2	1,0
Aceptable	1,4	1,2
Excepcionalmente aceptable	1,5	1,4

(Fuente: López Pita, 2006)

Nótese que para valores de $\theta = 0,2$ y $\Gamma_{defectos\ de\ via} = 0,2$ m/s², valores habituales, se obtienen valores para la aceleración sin compensar (Γ_{sc}) de 0,66 m/s² y 1 m/s² para viajeros de pie y niveles de comodidad bueno y excepcionalmente aceptable respectivamente.

Por criterios de confort del viajero, también se aconseja limitar la variación de la aceleración transversal o *jerk*. La bibliografía consultada suele coincidir en un valor de 0,4 m/s³.

Condiciones a cumplir en las alineaciones circulares

Radio mínimo

El radio mínimo absoluto en curvas viene determinado por el mínimo radio que los vehículos puedan negociar al circular en curva, que suele ser de 18 a 25 metros. Las ruedas de los tranvías presentan una configuración – menor diámetro y pestañas pequeñas – que les permite adaptarse a radios de giro menores en comparación al ferrocarril convencional.

Las recomendaciones del radio mínimo a utilizar están indicadas en el cuadro 3.3.

Cuadro 3.3 Recomendaciones sobre el radio mínimo en planta.

Fuente	Parámetro	Valor normal	Valor límite
CERTU	Radio mínimo	50 metros	20 – 25 metros
TCRP	Radio mínimo	35 metros	25 metros
CRTM	Radio mínimo	30 – 40 metros	

Estos valores mínimos pueden resultar útiles en zonas de inserción urbana compleja. De todas maneras conviene limitar su uso ya que inducen el envejecimiento prematuro de la infraestructura y del material, la reducción de la velocidad de circulación, la falta de confort a los viajeros, además de molestias al entorno debidas al ruido.

Longitud mínima alineación circular

El estudio de la longitud mínima de las alineaciones circulares se aborda en la guía del TCRP:

- La expresión utilizada es la misma que para alineaciones rectas, $L(m) = 0,57 \cdot V(\text{km/h})$. A diferencia de la longitud mínima de los segmentos rectos, la longitud mínima de los segmentos circulares se deduce a partir de exigencias al nivel de confort y no está relacionada con las características físicas del vehículo. Para geometrías restringidas, se puede tomar como longitud de referencia la longitud del segmento circular más la mitad de la longitud de cada una de las curvas de transición situadas en sus extremos.
- La longitud mínima excepcional de curvas debería ser de, aproximadamente, la distancia entre bogies. El uso de curvas sin segmento circular debe ser evitado.

3.2.4. Peralte

Peralte real - insuficiencia y exceso de peralte

Como se ha indicado con anterioridad, el peralte que compensa toda la aceleración transversal se denomina peralte teórico.

Cabe preguntarse si el peralte establecido en cada curva se ajusta al valor teórico correspondiente a cada velocidad. La respuesta es no, siendo los argumentos los siguientes:

1. La experiencia pone de relieve el interés de limitar el peralte a utilizar: peraltes muy altos pueden afectar la seguridad y el confort, y además, existen restricciones derivadas de la inserción urbana.
2. Nótese que la velocidad de circulación en una curva determinada no es siempre la misma, en el caso de tráfico heterogéneo de vehículos.

Con el fin de contextualizar el uso práctico del peralte en los sistemas tranviarios, es imprescindible analizar las restricciones de inserción urbana.

Veamos cuáles son las principales limitaciones. Primero, los giros del tranvía suelen coincidir con intersecciones del viario. Si el tramo en curva se peralta, se crearía una discontinuidad en la rasante que afectaría la circulación general al atravesar la plataforma tranviaria, ver foto 3.2.



Foto 3.2 Giro e intersección en un mismo lugar, Barcelona. (Fuente propia)

Segundo, no suele haber espacio suficiente para la implantación de curvas de transición que permitan establecer el peralte de forma gradual. Esto, conjuntamente con el hecho de que no se deben peraltar los tramos rectos por los efectos desfavorables asociados, imposibilita la colocación de peralte.

Las recomendaciones sobre el peralte máximo indicadas en el cuadro 3.4 están dirigidas a los casos en los que se pueda (y quiera) implantar peralte.

Cuadro 3.4 Recomendaciones sobre el peralte máximo a colocar en los casos viables.

Fuente	Parámetro	Ancho vía	Valor
CERTU	Peralte máximo	1435	150 mm
		1000	100 mm
TCRP	Peralte máximo	1435	100 mm
		1000	70 mm
	Peralte excepcional	1435	150 mm
		1000	100 mm
CRTM	Peralte máximo	1435	120 a 150 mm
		1000	80 a 100 mm

Con anterioridad se ha hecho la hipótesis de que el ángulo de la vía con la horizontal presentaba valores pequeños. Esta suposición queda confirmada por los valores presentados en este cuadro: la inclinación transversal no supera el 10%.

En síntesis, el peralte colocado no se ajusta al peralte teórico y siempre existirá una aceleración transversal no compensada que resentirá el viajero. Se pueden dar los siguientes casos: insuficiencia de peralte y exceso de peralte.

Insuficiencia de peralte

El vehículo circula en curva con una velocidad mayor que la de equilibrio para un peralte z . Aparece una aceleración transversal no compensada dirigida al exterior de la curva.

La insuficiencia de peralte se define como la diferencia entre el peralte teórico y el real:

$$I = z_t - z = \frac{S}{g} \cdot \frac{V^2}{R} - z = \frac{S}{g} \cdot \left(\frac{V^2}{R} - \frac{g}{S} \cdot z \right)$$

Teniendo en cuenta la expresión 3.2, se deduce:

$$I = \frac{S}{g} \cdot \Gamma_{sc}$$

Esta insuficiencia de peralte se debe limitar para garantizar la estabilidad del vehículo, el confort del viajero y un coste razonable del mantenimiento.

Exceso de peralte

El vehículo circula en curva con una velocidad menor que la de equilibrio para un peralte z . Aparece una aceleración transversal no compensada dirigida al interior de la curva.

El exceso de peralte se define como la diferencia entre el peralte real y el teórico:

$$E = z - z_t = z - \frac{S}{g} \cdot \frac{V^2}{R}$$

La relación del exceso de peralte con la aceleración transversal no compensada que crea es la siguiente:

$$E = \frac{S}{g} \cdot \Gamma_{sc}$$

En el ferrocarril convencional, el exceso de peralte provoca, junto al efecto de la gravedad, un mayor desgaste del carril interior de la curva, dificulta el arranque del vehículo parado en curva y disminuye el confort del viajero. En los sistemas tranviarios, el exceso de peralte es una situación que en la práctica no se da.

Para determinar el valor de l admisible, utilizamos la expresión que relaciona la insuficiencia de peralte con la aceleración sin compensar. Obtenemos:

	Ancho 1,435 m	Ancho métrico
$\Gamma_{sc} = 0,67 \text{ m/s}^2 \rightarrow$	$l_{\max} \approx 100 \text{ mm}$	$l_{\max} \approx 70 \text{ mm}$
$\Gamma_{sc} = 1,00 \text{ m/s}^2 \rightarrow$	$l_{\max} \approx 150 \text{ mm}$	$l_{\max} \approx 100 \text{ mm}$

En el cuadro 3.5 se muestran los valores recomendados de l por los diferentes organismos.

Cuadro 3.5 Valores máximo recomendados de la insuficiencia de peralte.

Fuente	Parámetro	Ancho vía	Valor
CERTU	Insuficiencia peralte máxima	1435	100 mm
		1000	70 mm
	Insuficiencia peralte excepcional	1435	150 mm
		1000	100 mm
TCRP	Insuficiencia peralte máxima	1435	75 mm
		1000	50 mm
	Insuficiencia peralte excepcional	1435	115 mm
		1000	80 mm

En la práctica hay insuficiencia de peralte y peralte. Existen diversas estrategias para combinar estos dos parámetros. Se puede aplicar la máxima insuficiencia permisible antes de recurrir al peralte. Otra opción es combinarlos con algún tipo de proporción, por ejemplo, que se implante la mitad del peralte teórico y la otra mitad sería insuficiencia.

La guía del TCRP ofrece las siguientes recomendaciones:

- No colocar peralte en curvas con peraltes teóricos de 25 milímetros o menos.
- Si el entorno físico limita el uso de peralte, permitir un máximo de 40 milímetros de insuficiencia de peralte antes de colocar peralte.

Implantación del peralte

La implantación del peralte en planta tiene tres opciones posibles:

1. Introducir el peralte en la alineación recta de forma que ya ha alcanzado su valor en la alineación circular.
2. Introducir el peralte al inicio de la alineación circular.
3. Establecer una parte del peralte en la alineación recta y otra parte en la alineación circular.

Estas configuraciones son posibles pero presentan inconvenientes tales como desgaste excesivo y rodadura incómoda. La solución a estas dificultades se encuentra en el uso de una curva de transición entre la alineación recta y la alineación circular. La elevación del peralte comenzaría al inicio de la curva de transición y terminaría con ella.

Por lo que respecta a la implantación del peralte en alzado, se efectúa elevando la cota del carril exterior y manteniendo la cota del carril interior, o se puede mantener la cota del eje, rebajar el carril interior y elevar el exterior.

Para más de una vía, hay dos tipos de peralte en función del perfil, ver figura 3.3: el peralte coplanar y el peralte vía a vía. En el primero, todos los carriles están en un mismo plano. En el segundo, los carriles no están alineados en un mismo plano.

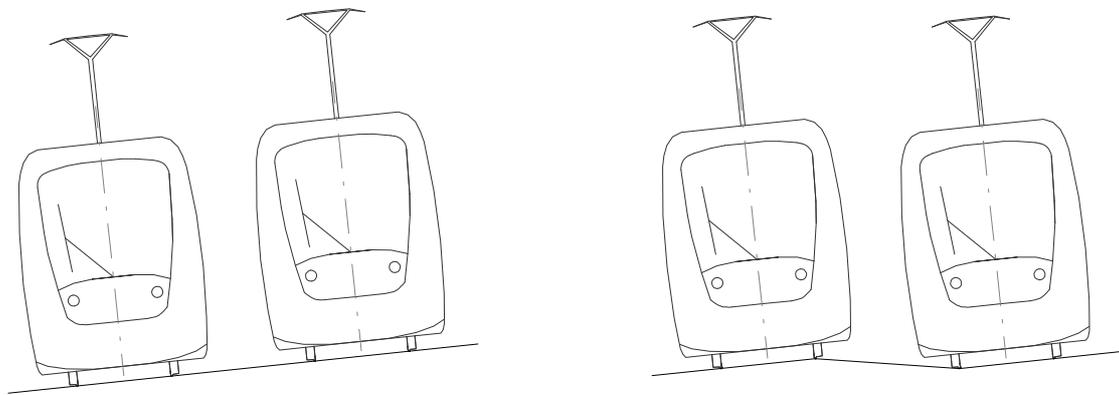


Figura 3.3 Peralte coplanar y peralte vía a vía.

En plataforma reservada, se pueden utilizar los dos tipos. En plataforma compartida, es preferible el peralte coplanar; el peralte vía a vía crearía irregularidades considerables en la calzada.

Velocidad máxima en curva

Atendiendo a consideraciones de confort del viajero, la velocidad máxima en una curva se define a partir del radio, de la aceleración transversal permisible y del peralte.

Curvas sin peralte

La aceleración transversal no compensada debida a la fuerza centrífuga es: $\Gamma_{sc} = \frac{V^2}{R}$

$$\Rightarrow V_{\max} = \sqrt{\Gamma_{\max} \cdot R}$$

En la foto 3.3 se puede apreciar un tranvía efectuando un giro y una señal que limita su velocidad a 15 km/h. Se trata de una curva sin peraltar de radio igual a 30 metros en un tramo de la red tranviaria de Barcelona.



Foto 3.3 Curva sin peraltar de radio 30 m en la que velocidad se limita a 15 km/h, Barcelona. (Fuente propia)

Curvas con peralte

La aceleración transversal no compensada debida a la fuerza centrífuga es: $\Gamma_{sc} = \frac{V^2}{R} - \frac{g}{S} \cdot z$

$$\Rightarrow V_{\max} = \sqrt{\left(\frac{g}{S} \cdot z + \Gamma_{\max}\right) \cdot R} \Rightarrow V_{\max} = \sqrt{\frac{(z + I_{\max}) \cdot R}{S/g}}$$

3.2.5. Curvas de transición

Definición

Mediante las curvas de transición se pretende evitar la aparición brusca de los efectos que generan las alineaciones curvas. El cambio de cero curvatura a una cierta curvatura debe ser

gradual de manera que el vehículo no de bandazos, repercutiendo negativamente en el confort del viajero y en la conservación del material.

La curva de transición permite una introducción progresiva de la curvatura y, por tanto, una variación gradual de la aceleración lateral. Además, en el caso de curvas peraltadas, permite la introducción progresiva del peralte.

Hay varias curvas que proporcionan la solución al problema planteado. La más utilizada es la clotoide, en la que el radio de curvatura es inversamente proporcional a la longitud de curva recorrida (figura 3.4).

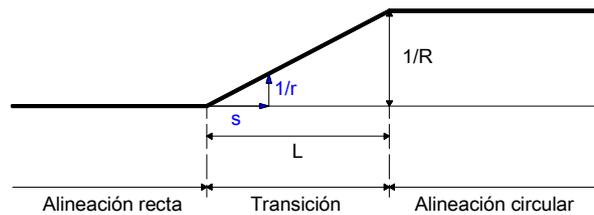


Figura 3.4 Variación lineal de la curvatura.

La clotoide se expresa de la siguiente forma:

$$r \cdot s = R \cdot L = A^2$$

Donde r es el radio de curvatura del punto situado a una distancia s del inicio de la curva de transición y la constante A es el parámetro de la clotoide.

Los principales parámetros, ilustrados en la figura 3.5, que definen la clotoide son:

- Retranqueo ΔR
- Parámetro x_0
- Ángulo α_L

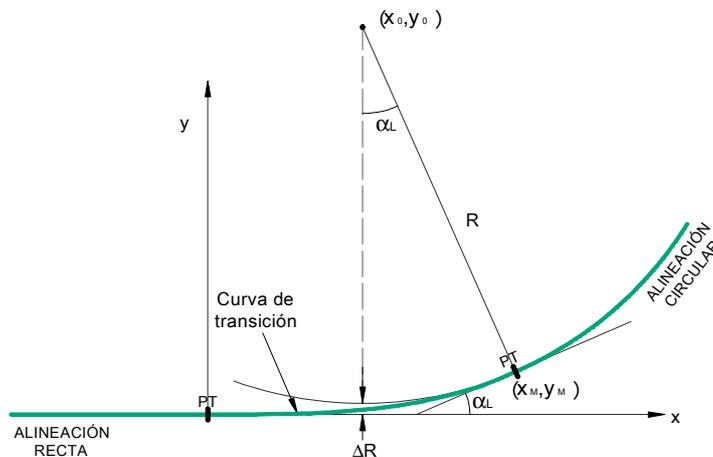


Figura 3.5. Principales parámetros de la transición en planta.

El parámetro α corresponde al ángulo de la tangente a la curva de transición con la horizontal. Su relación con el parámetro arco es $s = \sqrt{2} \cdot A \cdot \sqrt{\alpha}$, y en el punto de tangencia de salida cumple:

$$\alpha_L = \frac{L}{2 \cdot R} = \frac{A}{2 \cdot R^2} = \frac{L^2}{2 \cdot A^2};$$

Tomando como ejes de referencia los ejes x-y de la figura 3.4, las coordenadas de la curva de transición son:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{A}{\sqrt{2}} \int_0^\alpha \frac{\cos \alpha}{\sqrt{\alpha}} d\alpha \\ y = \frac{A}{\sqrt{2}} \int_0^\alpha \frac{\sin \alpha}{\sqrt{\alpha}} d\alpha \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{desarrollo} \\ \Rightarrow \\ \text{en serie} \end{array} \quad \left\{ \begin{array}{l} x = A \cdot \sqrt{2} \cdot \alpha \cdot \left(1 - \frac{\alpha^2}{5 \cdot 2!} + \frac{\alpha^4}{9 \cdot 4!} \dots \right) \\ y = A \cdot \sqrt{2} \cdot \alpha \cdot \left(\frac{\alpha}{3 \cdot 1!} - \frac{\alpha^3}{7 \cdot 3!} + \frac{\alpha^5}{11 \cdot 5!} \dots \right) \end{array} \right.$$

La primera aproximación del desarrollo en serie de la clotoide es la parábola cúbica. Mediante esta simplificación, se obtiene:

$$\Delta R = \frac{L^2}{24R} \qquad y(x_0) = \frac{\Delta R}{2}$$

$$x_M = L \ ; \ y_M = \frac{L^2}{6R} = \frac{L^3}{6A^2} \qquad x_0 = \frac{L}{2} \ ; \ y_0 = R + \Delta R$$

Longitud de las curvas de transición

Se trata de definir la longitud de la curva de transición para dar cumplimiento a una serie de requisitos relacionados con la comodidad, seguridad y conservación del material.

Limitación por confort

Este requisito obedece a criterios de confort del viajero y es aplicable a curvas con y sin peralte. Es deseable que el cambio de aceleración lateral sea lo menos brusco posible; por ello se debe limitar el jerk o variación de la aceleración a lo largo de la curva de transición. Como se ha indicado con anterioridad, el jerk se limita a 0,4 m/s³.

Una forma sencilla y rápida para determinar la longitud mínima es calcular el tiempo necesario para recorrer curva. En el caso más desfavorable $\Delta \Gamma \approx 1 \text{ m/s}^2$. Para $d\Gamma/dt < 0,4 \text{ m/s}^3$, se obtiene un tiempo de recorrido de 2,5 segundos. La expresión resultante sería pues $L(\text{m}) = 0,694 \cdot V(\text{km/h})$.

Un estudio más fino permite obtener una expresión en función de la velocidad y el radio de la alineación circular. En cualquier punto de la curva de transición se cumple:

$$\Gamma_r = \frac{V^2}{r} - \frac{g}{S} z_r \Rightarrow \frac{d\Gamma_r}{dt} = -\frac{V^2}{r^2} \frac{dr}{dt} - \frac{g}{S} \frac{dz_r}{dt}$$

De la expresión de la clotoide, $r \cdot s = R \cdot L$, se tiene $\frac{dr}{dt} = -\frac{r}{s} V$.

Resulta:
$$\frac{d\Gamma_r}{dt} = \frac{V^3}{r \cdot s} - \frac{g}{S} \frac{dz_r}{dt}$$

Como se verá más adelante, se limita la variación del peralte en el tiempo; lo que permite, en comparación con el primer término, despreciar el segundo término de la expresión anterior. En particular, la expresión se debe cumplir al final de la curva de transición. Imponiendo conjuntamente la condición de confort, se obtiene:

$$\frac{d\Gamma_r}{dt} = \frac{V^3}{R \cdot L} < 0,4 \text{ m/s}^3 \Rightarrow L > 2,5 \cdot \frac{V^3}{R} \quad \text{siendo } V \text{ en [m/s], } R \text{ en [m]}$$

Esta longitud mínima coincide con la propuesta por el CERTU. La recomendación de la guía del TCRP es algo más estricta pues considera un jerk máximo de $0,3 \text{ m/s}^3$.

En el documento del CERTU también se propone que la velocidad de cálculo de la clotoide sea la de la parte circular aumentada en un 20% cuando a esta le siga una alineación recta de gran longitud.

De la expresión anterior, fácilmente se puede deducir la velocidad máxima en la curva de transición:

$$V_{\max} = \sqrt[3]{R \cdot L \cdot \frac{d\Gamma}{dt}}$$

Otra forma de imponer el criterio de confort es mediante la limitación de la variación de la insuficiencia de peralte. Dado que la aceleración sin compensar y la insuficiencia de peralte están directamente relacionados, se trata de limitaciones equivalentes. Para $d\Gamma/dt < 0,4 \text{ m/s}^3$, se tiene $d//dt < 60 \text{ mm/s}$.

Limitación geométrica

La rampa de peralte se define como dz/ds y el alabeo como la diferencia de peraltes entre dos puntos. Su limitación tiene como objetivo reducir las tensiones excesivas sobre el material rodante y la vía, así como garantizar la estabilidad del vehículo.

Dado que en una clotoide la cota del hilo exterior varía linealmente, su derivada es constante y se puede expresar la rampa de peralte como $i = z / L$, en milímetros de cota por metro de vía. Cuando la curva de transición se establece entre alineaciones circulares, se toma como referencia la diferencia entre los peraltes en cada extremo.

La guía del TCRP recomienda un valor máximo de 2,7 mm/m. El manual del CRTM indica que se suele adoptar un valor de 4 mm/m.

Limitación dinámica

En una curva de transición con peralte, se limita la velocidad de ascensión para que la suspensión del vehículo sufra un impacto menor y tenga tiempo de adaptarse a la nueva geometría, de forma que no se produzca un descarrilo del vehículo.

Debido a la baja velocidad de circulación de los tranvías, esta limitación es menos restrictiva que en el ferrocarril convencional.

La guía del TCRP señala la siguiente expresión para evaluar la longitud mínima: $L(m) = 0,0046 \cdot V(\text{km/h}) \cdot z(\text{mm})$. Esta expresión se obtiene limitando la velocidad de ascensión a 60 mm/s.

3.3. TRAZADO EN ALZADO

3.3.1. Generalidades

El perfil longitudinal está constituido por un conjunto de rectas enlazadas entre sí mediante acuerdos verticales. A las rectas de inclinación descendente se las denomina pendientes y a las de inclinación ascendente se las denomina rampas. La inclinación se expresa normalmente en ‰.

En lo que concierne a los acuerdos verticales, se efectúan mediante parábolas. De forma análoga a las curvas de transición en el trazado en planta, permiten realizar de forma progresiva el cambio de inclinación.

3.3.2. Inclinación de la rasante

La máxima inclinación posible viene determinada por las restricciones derivadas de la capacidad adherente de la rueda al carril y la potencia del material móvil.

Por lo que concierne al primer aspecto, la adherencia rueda-carril, interesa que exista una cierta adherencia de forma que la rueda no deslice sobre el carril. Se trata de un fenómeno en el que intervienen diversos factores. Se verifica que la adherencia disminuye con el aumento de la velocidad y en el caso de que el carril esté mojado o esté cubierto de hojas caídas de árboles.

Con el fin de mejorar las condiciones de adherencia, los vehículos tranviarios disponen de depósitos de arena o areneros que vierten arena entre la rueda y el carril.

Según el tipo de material móvil utilizado, podemos adoptar como criterio de referencia la tasa de motorización de la unidad móvil $T_m = M_m / M_t$ (cociente entre la masa sobre ejes motorizados y la masa total). La inclinación máxima, en tramos de longitud inferior a 250 m, se puede aproximar por una décima parte de T_m . Se obtienen inclinaciones máximas de 6 a 7 % para unidades con dos bogies motores y uno portador y de 9 a 10 % para unidades con todos los ejes motores.

En los tramos en curva se debe considerar la resistencia debida a las curvas y sumarla a la resistencia en rampa, resultando la siguiente rampa ficticia:

$$i' = i + \frac{800}{R}$$

siendo R : radio de la curva en [m]

i : inclinación de la rampa en [‰]

i' : inclinación de la rampa ficticia en [‰]

Por otro lado, para asegurar un buen drenaje superficial se debe fijar una pendiente mínima. Los valores recogidos por la UITP son de 1 a 1,5 %, y de forma excepcional 0,5 %. La guía del TCRP indica un valor mínimo de 0,2 %.

A pesar de que técnicamente se puedan alcanzar valores mayores, es necesario limitar el uso de fuertes inclinaciones con el fin de facilitar la explotación de la línea, reducir costes y mejorar el confort de la marcha.

3.3.3. Acuerdos verticales

Definición

Las distintas rasantes se enlazan entre sí mediante parábolas definidas por un parámetro denominado K_v . Se emplean parábolas de eje vertical y de parámetro muy grande, utilizando la parte próxima al vértice. En estas condiciones, la parábola toma prácticamente la forma de una circunferencia, pero a diferencia de esta última, en la parábola la variación de la pendiente es constante.

El parámetro K_v equivale al radio de curvatura en el vértice y cumple la relación $L = K_v \cdot \theta$, siendo L la longitud de la transición y θ la variación de la inclinación de la rasante. Si se quiere expresar la inclinación en %, la relación sería $L = K_v \cdot \theta \cdot 0,01$. El valor que toma θ es el siguiente:

- 1) Si la inclinación cambia de sentido: $\theta = |i_1| + |i_2|$
- 2) Si la inclinación cambia de valor pero no de sentido: $\theta = |i_1 - i_2|$

En lo que sigue se presentan las expresiones necesarias para caracterizar geoméricamente el acuerdo vertical. En la figura 3.6 se muestran los diferentes parámetros que intervienen.

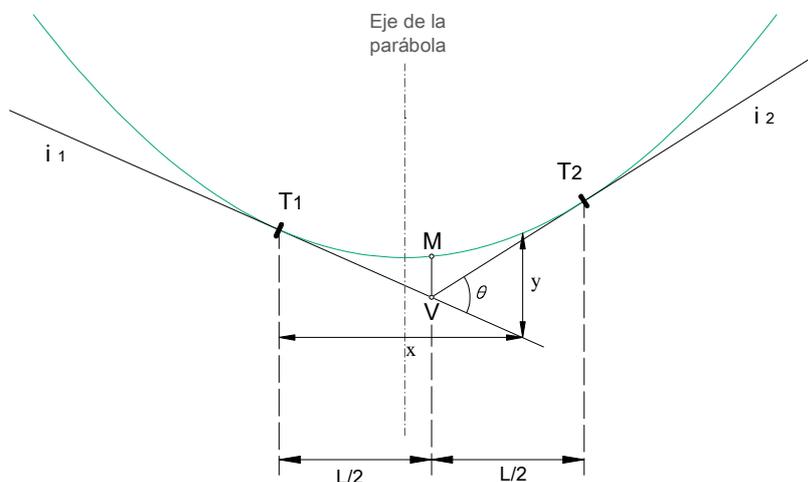


Figura 3.6 Acuerdo vertical parabólico entre inclinaciones de distinto sentido.

De las propiedades de la parábola se deduce que:

- La diferencia de cota entre el vértice del acuerdo (V) y el acuerdo parabólico es

$$\overline{MV} = \frac{\theta \cdot L}{8} = \frac{K_v \cdot \theta^2}{8}$$

- El vértice del acuerdo es equidistante horizontalmente entre el punto de tangencia de entrada (T_1) y el de salida (T_2)

En estas condiciones, y tomando como referencia las coordenadas x,y de la figura 3.6, la ecuación del acuerdo parabólico es:

$$y = \frac{x^2}{2 \cdot K_v}$$

Por lo que respecta a la dinámica en el acuerdo vertical, veamos qué acciones intervienen. Consideremos un vehículo que recorre a velocidad V un acuerdo vertical de radio R_v . Sobre él actúa, en el plano vertical, una aceleración centrífuga de valor:

$$\Gamma_v = \frac{V^2}{R_v}$$

La aceleración máxima que se produce en el acuerdo se obtiene para $R_v = K_v$.

Condiciones a cumplir en el acuerdo vertical

Las restricciones a considerar, están relacionadas con el confort del viajero y la compatibilidad con el material móvil. Se establecen limitaciones sobre el radio, la longitud del acuerdo vertical y la distancia entre acuerdos.

En relación con el radio mínimo vertical, se han de tener en cuenta los siguientes objetivos:

- Mantener la distancia necesaria entre la parte inferior del vehículo y la superficie de rodadura, y respetar el movimiento angular de las articulaciones.
- Limitar la aceleración percibida por el viajero.

Los valores del radio mínimo absolutos se deducen a partir de las restricciones derivadas del material móvil. Se debe garantizar una distancia mínima entre la parte inferior del vehículo y superficie de rodadura.

A título indicativo, en la ficha UIC 505-1 – relativa a los gálbos de construcción del material móvil – los cálculos del gálbo vertical se hacen tomando como referencia los valores mínimos de 250 metros para acuerdos convexos (\cap) y 300 metros para acuerdos cóncavos (\cup). El uso de radios inferiores requeriría un diseño especial del material móvil.

Los valores deseables del radio mínimo se obtienen adoptando como criterio de referencia el confort del viajero. Su confort está relacionado, tal y como se explicó en el capítulo del trazado en planta, con las aceleraciones que experimenta el viajero. El nivel de la aceleración en el plano

vertical se limita a 0,2-0,4 m/s². Teniendo en cuenta la expresión de Γ_v , se puede establecer el radio mínimo del acuerdo. Para $\Gamma_v \leq 0,2$ m/s², se tiene:

$$K_v \geq 0,39 \cdot V^2$$

siendo V en [km/h] y K_v en [m]

Para una velocidad de 50 km/h, se obtiene un radio en el entorno de 1000 metros. En algunas ocasiones hay que recurrir a radios inferiores, siempre respetando los valores límite.

En el cuadro 3.6 se exponen las recomendaciones extraídas de la bibliografía consultada.

Cuadro 3.6 Recomendaciones sobre el radio mínimo en acuerdos verticales.

Fuente	Parámetro	Valor normal	Valor límite
CERTU	Radio mínimo acuerdo vertical	$K_v \geq 0,39 \cdot V^2$	700m (∩) 350m (∪)
TCRP	Radio mínimo acuerdo vertical	$K_v \geq \frac{V^2}{2,15}$ (∩) $K_v \geq \frac{V^2}{3,87}$ (∪)	250m (∩) 350m (∪)
CRTM	Radio mínimo acuerdo vertical	$K_v \geq 0,4 \cdot V^2$	700m (∩) 350m (∪)

Unidades: K_v en [m] y V en [km/h]

La sensación de incomodidad es más acentuada en los acuerdos convexos que en los cóncavos. De ahí que el radio recomendado para acuerdos convexos sea, en general, mayor que para los cóncavos.

Por lo que concierne al segundo aspecto, la longitud de la transición, se persigue reducir la variación brusca de la aceleración vertical. En los extremos del acuerdo se produce un salto de la aceleración provocando la oscilación de la suspensión del vehículo. Debe haber una distancia suficiente para permitir la amortiguación de la suspensión y evitar que se acoplen las oscilaciones producidas en la entrada y en la salida del acuerdo, lo cual crea sensación de incomodidad al viajero. Las recomendaciones del CERTU indican una longitud mínima de 20 metros.

El fenómeno del salto de la aceleración se ve agravado entre dos acuerdos consecutivos. Por ese motivo, se debe establecer una longitud mínima de las rasantes uniformes entre acuerdos.

La guía del TCRP recomienda una longitud $L(m) = 0,57 \cdot V(km/h)$, y como límite una longitud de 12 metros.

Es de interés señalar que, a nivel de confort, el salto brusco de la aceleración vertical es más desagradable para el viajero que el hecho de estar sometido a una aceleración vertical constante.

3.4. PERFIL TRANSVERSAL

3.4.1. Generalidades

El estudio del perfil transversal tiene como finalidad principal establecer la mínima separación entre el vehículo y los obstáculos adyacentes, así como la entrevía, que permitan una circulación segura.

La búsqueda de la solución se efectúa mediante el concepto de gálibo. El gálibo no es más que un contorno de referencia transversal con unas reglas asociadas.

Las reglas abordan aspectos como la suspensión de los vehículos, los efectos de la circulación en curva o las distancias mínimas de seguridad; ver cuadro 3.7.

Cuadro 3.7 Reglas para definir los diferentes gálivos.

Reglas	
- Descenso y rebote suspensiones	- Inscripción en acuerdos verticales
- Desgaste rueda	- Sobreancho y sobrealto en curvas peraltadas
- Desgaste carril	- Oscilaciones laterales aleatorias
- Inscripción en curvas horizontales	- Tolerancias ejecución
- Holguras (rueda-carril, eje-bastidor, bastidor-caja)	- Márgenes de seguridad
- Exceso o insuficiencia peralte (coeficiente flexibilidad)	
- Disimetría	

Para simplificar el proceso, se pueden agrupar las reglas bajo diferentes gálivos. A efectos de trazado, el gálibo que interesa es el denominado gálibo límite de obstáculos que constituye el volumen en que se inscribe el vehículo y define el espacio dentro del cual no se debe implantar ningún elemento fijo.

3.4.2. Gálibo del material móvil

El gálibo estático o de construcción del material está conformado por el contorno del vehículo parado en alineación recta y horizontal, con las suspensiones regladas y cuyos componentes no han sufrido desgaste.

El gálibo dinámico corresponde al espacio ocupado por el vehículo en movimiento. Depende únicamente del tipo de material y de las condiciones en las que se utiliza. Se deduce a partir del gálibo estático más los desplazamientos que pueda presentar el vehículo (figura 3.7). Se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Desgaste de las ruedas y los carriles
- Holguras: juego rueda-carril, eje-bastidor, bastidor-caja
- Desplazamientos por aceleración no compensada (flexibilidad de las suspensiones)
- Inscripción en curva

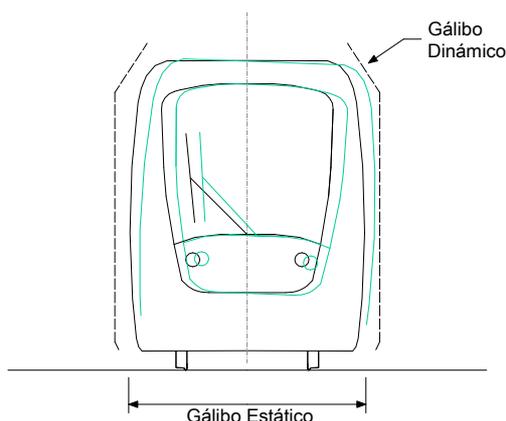


Figura 3.7 Gálibo estático y dinámico.

Los valores del gálibo dinámico son elaborados por el constructor del material a partir de las hipótesis de trazado, del proyecto de explotación o de la especificación del sistema, tales como los radios de giro, la velocidad de circulación, etc.

Inscripción en curva

La inscripción en curva se traduce en un desplazamiento entre el eje del vehículo y el eje de la vía que implica un sobreaño respecto al gálibo en alineación recta. Dicho desplazamiento es función de la sección transversal del vehículo considerada y de si se trata de un punto en el interior o en el exterior de la curva.

El sobreancho se calcula para las secciones más desfavorables y su valor es función de la distancia entre bogies y de la distancia entre los bogies y los extremos de las cajas del vehículo.

Es necesario tener en cuenta que los sobreanchos debidos a la inscripción en curva modifican el gálibo de las secciones en curva y también el de algunas secciones en recta.

En la figura 3.8 se representa de forma esquemática el desplazamiento del eje de un vehículo con dos pivotes respecto al eje de la vía en una transición de alineación recta a alineación circular. Aunque la configuración del vehículo no corresponda a la de un tranvía, este ejemplo permite ilustrar la aparición de sobreanchos en tramos rectos.

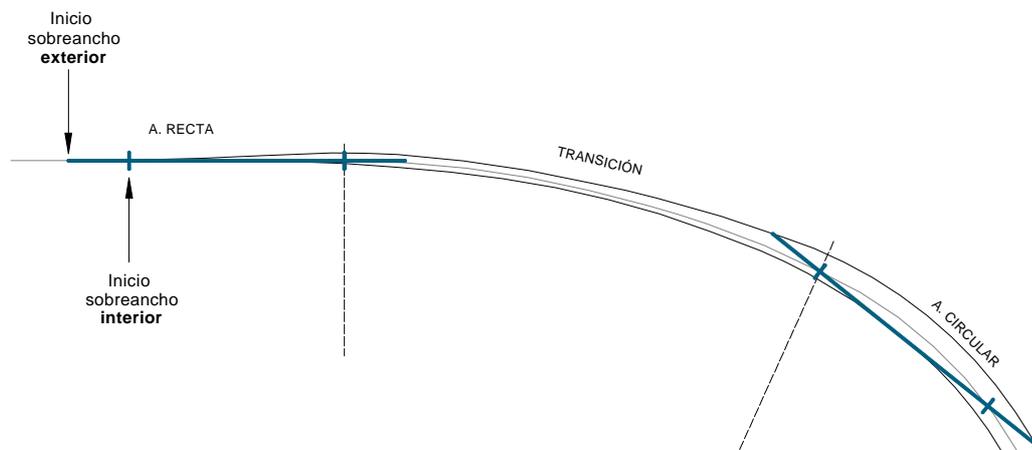


Figura 3.8 Variación de los salientes en una transición.

En cuanto el primer bogie entra en la curva de transición, la parte posterior del vehículo comienza a presentar un saliente; de forma que resulta necesario considerar los salientes exteriores a partir de una determinada distancia antes del inicio de la curva de transición.

De forma similar, en el interior de la curva, los puntos entre los dos bogies son desplazados hacia el interior de la curva en cuanto el primer bogie entra en la curva de transición.

3.4.3. Gálibo límite obstáculos y entrevía

El gálibo libre de obstáculos (GLO) define el espacio que debe respetar todo obstáculo con el fin de permitir la circulación segura del vehículo. Se determina a partir del gálibo dinámico del vehículo aumentado de unas láminas de aire que engloban:

- Las tolerancias de ejecución
- La deformación de las vías

- Los sobreamchos y sobrealts debidos al uso de peralte
- Un margen de seguridad

Se entiende por entrevía la distancia entre ejes de vías. La existencia de postes de catenaria influye en el valor de la entrevía. Para postes no centrales, se considera una lámina de aire entre los gálibos dinámicos de los vehículos. Para postes centrales, se debe considerar la anchura del poste y una lámina de aire a cada lado.

Destacar que para radios pequeños, no es usual la instalación de postes centrales debido, en primer lugar, al elevado número de postes y, en segundo lugar, a que las sujeciones de los hilos en el lado exterior de la curva se someten a unos esfuerzos de compresión para los que a menudo no están diseñados los elementos que componen el sistema de catenaria.

En la foto 3.4 se observa un poste central en el tramo recto y poste lateral en el inicio de la curva.



Foto 3.4 Poste central en tramo recto y lateral en curva, Barcelona. (Fuente propia)

Secciones tipo

En las figuras 3.9 a 3.13 se representan de forma esquemática los gálibos estático, dinámico y libre de objetos en vía única/doble, con o sin poste central y en alineación recta/curva.

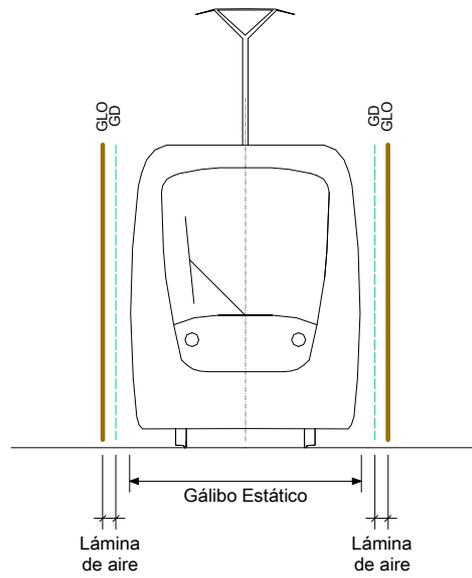


Figura 3.9 Vía única en recta.

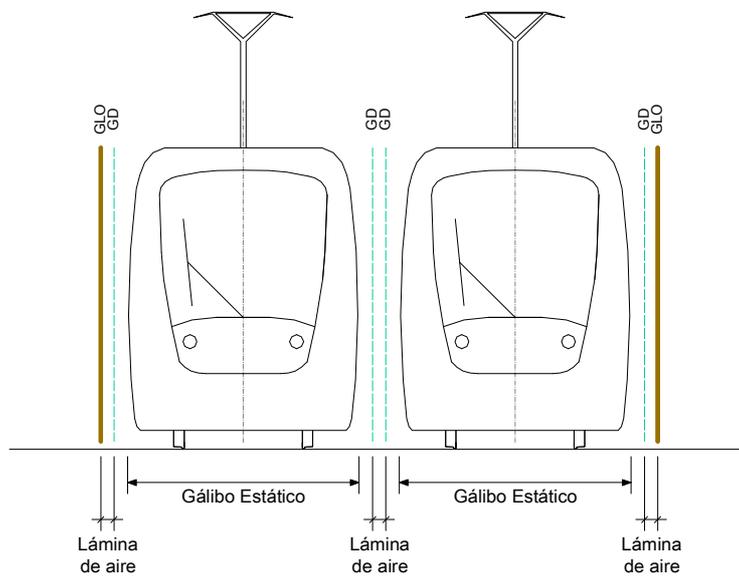


Figura 3.10 Vía doble en recta sin poste central.

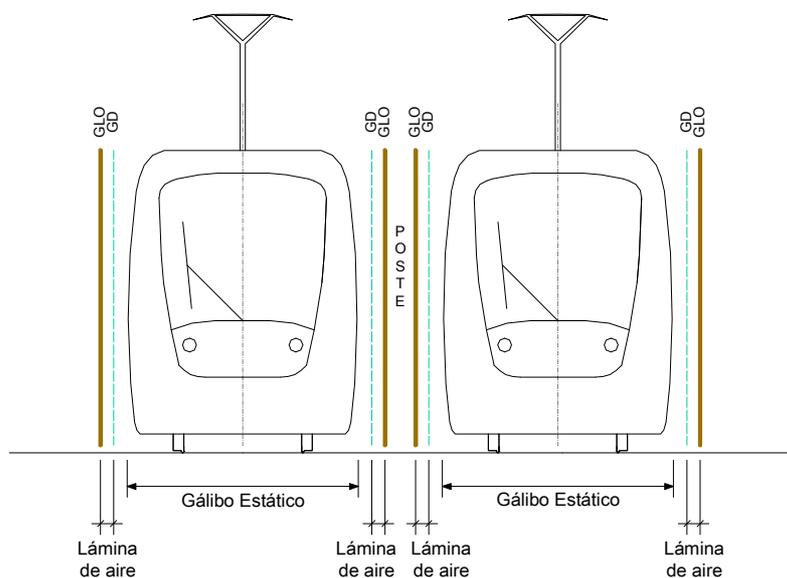


Figura 3.11 Vía doble en recta con poste central.

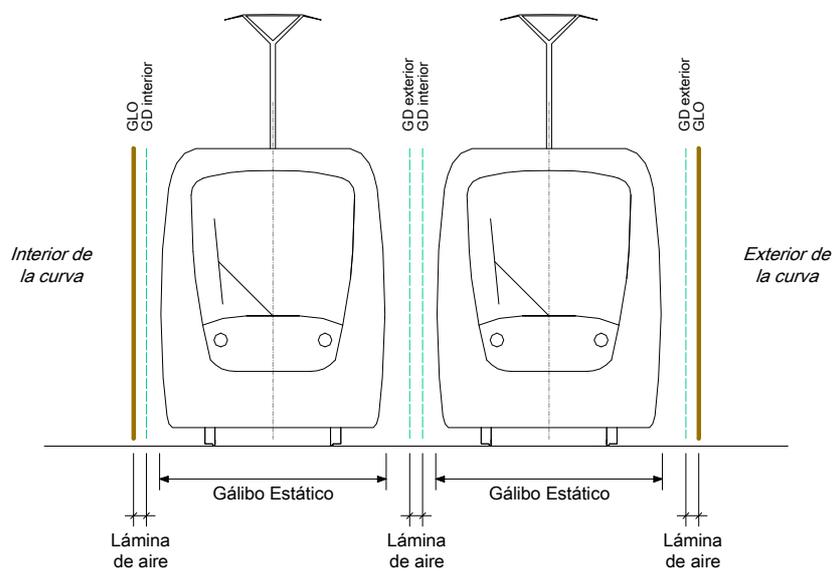


Figura 3.12 Vía doble en curva sin poste central.

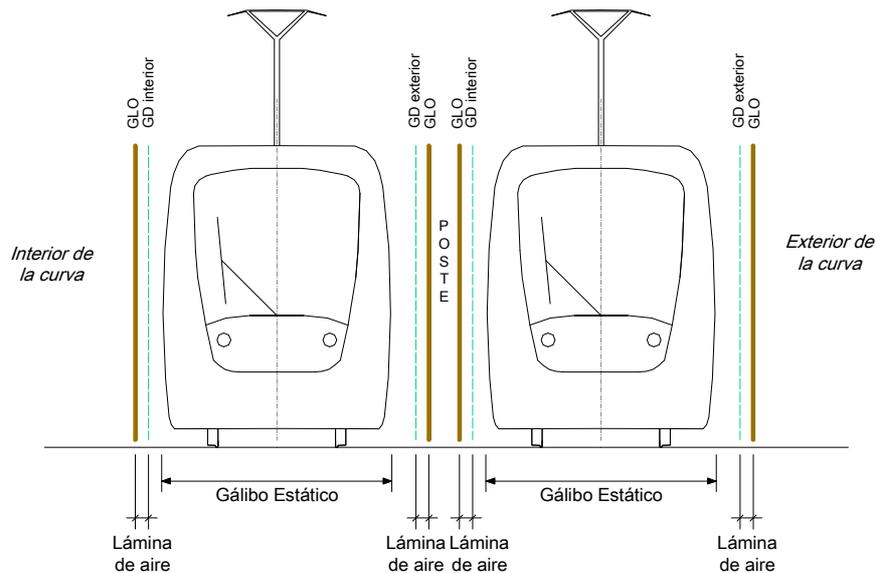


Figura 3.13 Vía doble en curva con poste central

Lámina de aire

Los valores de la lámina de aire generalmente utilizados son los de 100 y 150 mm.

El documento Office of Rail Regulation (2006) contiene un estudio más amplio concerniendo el gálibo límite de obstáculos. Ofrece las recomendaciones, señaladas en el cuadro 3.8, para el valor de la lámina de aire en función de la estructura adyacente.

Cuadro 3.8 Valor de la lámina de aire.

Carril de tráfico	200 mm
Acera	300 mm
Obstáculo aislado	100 mm
Obstáculo continuo	600 mm

(Fuente: Office of Rail Regulation, 2006)

Nótese que los valores en caso de carril de tráfico y acera son superiores; esto se debe a los movimientos imprevistos que pueden presentar los vehículos y peatones.

Las recomendaciones indicadas hasta el momento cubren el gálibo libre de obstáculos en el sentido horizontal.

En cuanto al gálibo vertical, se debe añadir una lámina de aire al contorno del gálibo dinámico y tener en cuenta, para líneas aéreas de contacto, el pantógrafo. De cara al paso del vehículo bajo

viaductos u otras estructuras, es recomendable considerar el desfase que se produce en los acuerdos verticales entre el eje del vehículo y el eje de la vía.

3.5. PARTICULARIDADES

3.5.1. Combinación del trazado en planta y alzado

Es deseable evitar la combinación de curvas en planta con acuerdos en el alzado dado que empeora el confort del viajero y crea esfuerzos de torsión sobre los carriles, causando su desgaste prematuro. No obstante, es una situación inevitable. Se trata de la configuración que se suele dar en los giros de tranvías que se efectúan en cruces.

En el caso de que la implantación conjunta de curvas en planta y acuerdos verticales sea ineludible, se pueden tolerar, para inclinaciones débiles, las combinaciones expuestas en el cuadro 3.9.

Cuadro 3.9 Combinación planta y alzado.

Planta	Alzado
R de 40 a 70 m	$K_v \geq 3000$ m
R de 70 a 200 m	$K_v \geq 1500$ m

(Fuente: CERTU, 2000)

La coincidencia de un mínimo en planta con un mínimo en alzado debe ser evitada en cualquier circunstancia. En caso insalvable, el fabricante del material móvil deberá simular los elementos de diseño del material, de forma que los vehículos puedan franquear con garantías el conjunto de planta y alzado.

3.5.2. Condicionantes vinculados a las estaciones

En este apartado se tratan principalmente los aspectos de trazado. En el siguiente capítulo, sobre inserción urbana del tranvía, se completa el estudio sobre las estaciones.

Trazado en planta

Siempre que sea posible, las estaciones se deben implantar en tramos rectos. Los argumentos que conducen a esta conclusión son los siguientes:

- Inserción del material móvil: un andén en curva dispone de un borde redondeado, en contraste con la forma poligonal del vehículo tranviario.
- Accesibilidad: con el objeto facilitar un acceso seguro y rápido de los pasajeros, el *gap*, o distancia entre el vehículo y el borde del andén, debe ser la mínima posible. Una estación en tramo recto permite disponer de una distancia mínima constante a lo largo de todo el andén.
- Visibilidad: la estación en curva conlleva problemas de visibilidad por parte del conductor sobre el acceso de los pasajeros al vehículo.

Cuando la estación se debe implantar necesariamente en curva, se dispone de la siguiente recomendación de la UITP: radio mínimo de 300 metros.

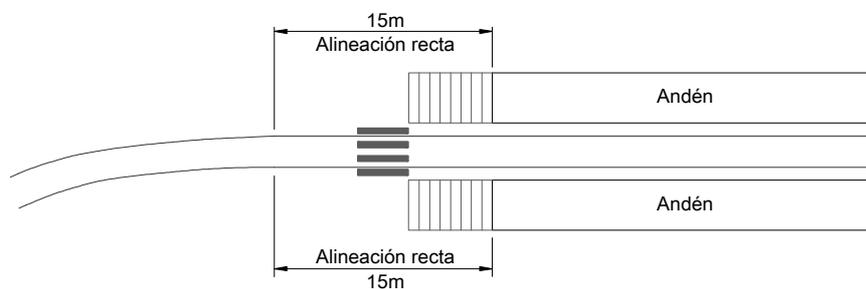


Figura 3.14. Alineación recta mínima previa a la parada del tranvía.

Para asegurar una buena alineación del vehículo respecto al andén, se debe prever una cierta alineación recta en ambos extremos de la estación. La guía del TCRP indica que dicha alineación recta debe tener por lo menos 15 metros de longitud (figura 3.14). Este tramo recto puede dar cabida a las rampas de acceso y cruces de peatones.

Trazado en alzado

En general, las diferentes recomendaciones coinciden en un valor máximo de la inclinación de 2% en las estaciones. La situación ideal sería la de una estación en horizontal técnica, siempre y cuando se incluya un drenaje adecuado de la vía. Un valor mínimo de 0,2% sería deseable de cara a evitar la formación de charcos en la plataforma.

Es recomendable que la rasante tenga una inclinación constante. La guía del TCRP indica que la rasante uniforme se prolongue 12 metros más allá de los extremos de la estación. Si la estación coincide obligatoriamente con un acuerdo vertical, se recomienda el parámetro K_v tenga un valor generoso. En este caso, la combinación con curva en planta no es aceptable.

Perfil transversal

Por lo que respecta al gálibo en las estaciones, el elemento a estudiar es la distancia entre el límite del andén y el límite de la puerta del vehículo, o gap. El estudio debe abordarse desde la doble óptica de facilitar la accesibilidad a los usuarios y evitar el contacto entre el material móvil y el andén.

En relación al primer aspecto, se persigue tener la mínima distancia horizontal y vertical posible entre el andén y el límite de la puerta del vehículo. A título indicativo, el documento *Codi d'accessibilitat de Catalunya* recomienda un gap máximo de 35 mm en sentido horizontal y 10 mm en sentido vertical para el acceso a ascensores.

Para abordar el segundo aspecto, se define la distancia mínima entre el borde del andén y el eje de la vía. Se determina teniendo en cuenta los efectos dinámicos del vehículo, los efectos de la vía – desgaste y tolerancias –, y el trazado de la vía.

En la foto 3.5a se muestra el inicio del andén de una parada de tranvía en Barcelona. Y en la foto 3.5b se puede apreciar el gap resultante.

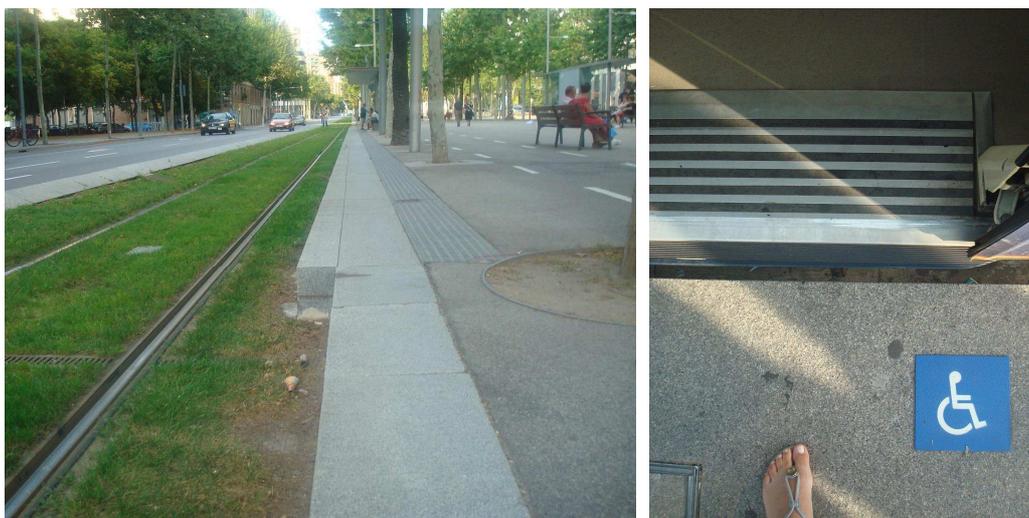


Foto 3.5 a) Izquierda: inicio andén parada, Barcelona. **b)** Derecha: gap horizontal, Barcelona. (Fuente: propia)

Por último, destacar que en la configuración inicial, previa al desgaste de ruedas y vías, el límite de la puerta debe de quedar más alto que el andén de forma que con el paso del tiempo no quede a un nivel inferior.

3.5.3. Condicionantes vinculados a cocheras y vías de maniobra

En la concepción del trazado de la vía en cocheras, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La velocidad de circulación es inferior a la de la línea principal.
- El vehículo circula sin pasajeros, siendo innecesarias las exigencias de confort.

Teniendo en cuenta estos aspectos, es obvio que los valores límite de los parámetros geométricos que caracterizan el trazado difieren de los de la línea principal.

Trazado en planta

En lo que concierne al trazado en planta, los radios de curvatura utilizados pueden descender al valor mínimo absoluto. La guía del TCRP recomienda, de cara a facilitar la posterior explotación, un valor mínimo ideal de 25 metros. También recomienda que los tramos rectos entre curvas tengan una longitud equivalente, por lo menos, a la distancia entre bogies del vehículo.

Cabe preguntarse si es necesario disponer de una alineación recta a la entrada de las instalaciones. La respuesta es que sí, si se quieren evitar diseños especiales de la puerta de acceso. Por otro lado, es de interés señalar que no es necesario el uso de curvas de transición.

Trazado en alzado

Respecto al trazado en alzado, por razones de seguridad, se debe limitar la inclinación de la vía. Las recomendaciones de la UITP y del CERTU coinciden en un valor máximo de 2% para las cocheras, vías de maniobra y el final de la línea.

La guía del TCRP distingue en función de la ubicación: para las vías de maniobra indica un valor máximo de 1%, y para las cocheras un valor máximo de 0,2%. Además, recomienda que las vías de las cocheras se instalen formando una “v” para evitar que los vehículos rueden hacia un extremo o el otro.

3.5.4. Condicionantes vinculados los aparatos de vía

Los aparatos de vía permiten la conexión, ver figura 3.15, y el cruce entre diferentes vías.

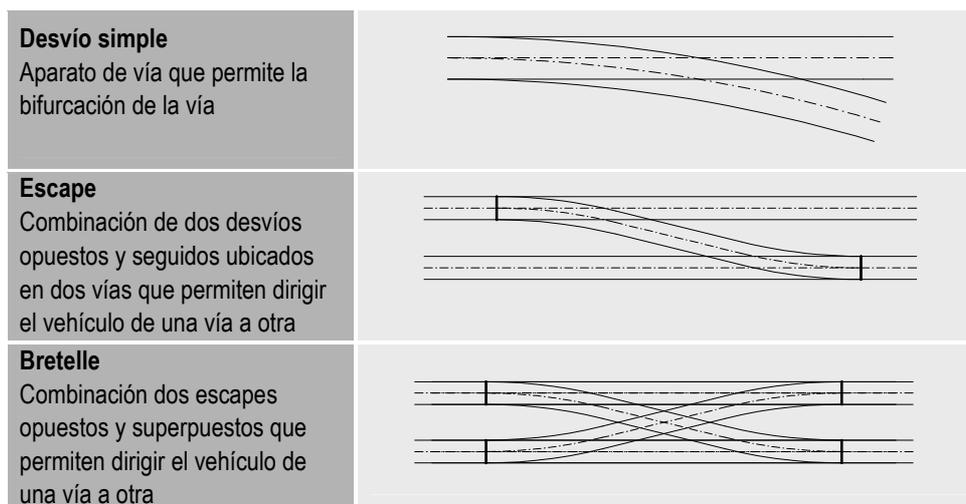


Figura 3.15. Aparatos de vía de conexión.

Los aparatos de cruce permiten, tal y como indica el nombre, el cruce entre dos o más vías. A diferencia de los desvíos, los cruces no disponen de elementos móviles.

Las características y distribución de los aparatos de vía vienen determinados por el proyecto de explotación. Las dimensiones principales son función de la velocidad de paso por la vía desviada; a mayor velocidad, mayor radio y longitud del desvío.

El emplazamiento de los aparatos de vía debe ser lo más práctico posible. Hay que tener en cuenta que en vías con carril embebido o con fijación directa, los aparatos de vía resultan más caros y difíciles de mantener. Por lo tanto, se buscarán emplazamientos de los aparatos que sean lo más prácticos posibles y no conlleven dificultades añadidas. Siempre que sea posible, se recomienda establecer los aparatos de vía en alineaciones rectas y de inclinación constante. Asimismo, su emplazamiento no debería coincidir con pasos de peatones.

Tal y como se ha comentado, el trazado en planta óptimo corresponde a los tramos rectos. En los desvíos, esta configuración se puede mejorar añadiendo, en el tramo previo al aparato de vía, un segmento recto. Los desvíos implican un fuerte cambio de la dirección, por lo que es altamente deseable que las ruedas circulen lo más suavemente al acercarse al desvío. La guía del TCRP señala una distancia previa mínima de 3 metros e indica un valor deseable de 10 a 15 metros.

Los aparatos de vía se pueden ubicar en tramos en curva. No obstante, se constatan las siguientes desventajas: requieren un mayor mantenimiento, disminuyen el confort de la marcha e incrementan los problemas de ruido. Además, requieren un diseño más específico que se traduce en precios elevados. Por otro lado, la implantación de los aparatos de vía en curvas con peralte no es factible. En relación con el trazado en alzado, la ubicación más adecuada es aquella de inclinación constante y de valor no superior a 4,5%.

3.6. RESUMEN DE LOS PRINCIPALES CRITERIOS DE TRAZADO

A lo largo de este capítulo se han estudiado los parámetros de trazado de la vía y los criterios de referencia que permiten acotar el rango de valores que adoptan. En este sentido, se han señalado diferentes valores límite de dichos parámetros. Con el fin de sintetizar la información presentada, se recogen en los cuadros 3.10 y 3.11 los valores límite considerados más adecuados.

Cuadro 3.10 Valores límite de los parámetros de trazado en planta, alzado y perfil transversal.

Parámetro	Valor normal	Valor excepcional
TRAZADO EN PLANTA		
Aceleración transversal sin compensar máxima	0,65 m/s ²	1 m/s ²
Jerk transversal máximo	0,4 m/s ³	
Radio mínimo horizontal	50 m	25 m
Longitud mínima alineación recta	longitud vehículo	distancia entre bogies
Longitud mínima alineación circular	longitud vehículo	distancia entre bogies
Longitud mínima curva de transición	$L > 2,5 \cdot \frac{V^3}{R}$ unidades en S.I.	
Peralte máximo	100 mm	150 mm
Insuficiencia de peralte máxima	100 mm	150 mm
Rampa de peralte máxima	4 mm/m	
TRAZADO EN ALZADO		
Inclinación máxima	= función (material móvil)	
Inclinación máxima en curva	$i + 800/R \leq i_{\max}$	
Inclinación mínima	10 ‰	5 ‰
Aceleración vertical máxima	0,2 m/s ²	0,4 m/s ²
Radio mínimo acuerdo vertical	$K_v \geq 0,4 \cdot V^2$ V [km/h], K_v [m]	700m (∩) 350m (∪)
PERFIL TRANSVERSAL		
Lámina de aire	100 y 150 mm	

Cuadro 3.11 Valores límite de los parámetros de trazado en situaciones singulares.

Parámetro	Valor normal
PARTICULARIDADES	
Combinación curva en planta y acuerdo vertical	R de 40 a 70m: $K_v \geq 3000$ m R de 70 a 200m: $K_v \geq 1500$ m
Radio mínimo en estación	300 m
Longitud mínima alineación recta antes de estación	15 m
Inclinación máxima en estación	20 ‰
Radio mínimo en cocheras	= función (material móvil)
Inclinación máxima en cocheras	20 ‰
Inclinación máxima con aparatos de vía	45 ‰

Tal y como se ha remarcado en ocasiones anteriores, siempre que se pueda se debe evitar el uso de valores límite. Este objetivo es alcanzable en un contexto ideal, como por ejemplo nuevas zonas urbanas en las que se pueda planificar la red de transportes previamente a su construcción y cuya topografía sea suave.

Esto no es lo habitual, la mayor parte de las veces hay que adaptarse a la geometría urbana existente, y en consecuencia, adoptar valores de los parámetros de trazado más cercanos al límite. Esta realidad está reflejada en los datos sobre parámetros de trazado de diversas ciudades europeas presentados en el Anejo 2.

En todo caso y como se sabe, la elección de cualquier magnitud suele ser el resultado de un compromiso entre lo deseable y lo posible.

4 . INSERCIÓN URBANA DEL TRANVÍA

4.1. EL ESPACIO PÚBLICO

El espacio público es el soporte, a nivel espacial y funcional, del tranvía. Su conocimiento es esencial ya que marca las principales características de un sistema tranviario. A su vez, el tranvía transforma el espacio público.

Para introducir este tema vale la pena citar a Manuel Herce (2009): “La calle es el elemento básico de organización de la ciudad; en ella se concentran todas las funciones sobre las que descansan las interrelaciones entre las personas y las diversas actividades, lo que constituye la esencia de lo urbano”.

Se trata de una definición enfocada a la funcionalidad del espacio público. No es la única, pero nos permite estudiar de forma adecuada la inserción urbana del tranvía.

Al mismo tiempo, las consideraciones estéticas influyen en la solución. El número de usuarios visuales de las infraestructuras tranviarias es considerable por lo que se le debe prestar especial atención a su funcionalidad visual. No obstante, este criterio no puede ser el único a la hora de proyectar el espacio público, sino que ha de ser complementario.

En este capítulo se aborda el estudio del espacio público desde la óptica de la movilidad urbana. La calle es entendida pues como el soporte de las diferentes formas de movilidad.

4.1.1. Inserción urbana del tranvía

La creación de un eje tranviario en una zona urbana ya establecida impone grandes restricciones a la inserción de la línea. Los parámetros de trazado quedan condicionados por la anchura y pendiente de las calles, y también por los radios de giro impuestos por la geometría urbana.

En el capítulo anterior se ha expuesto toda una serie de criterios de trazado para mejorar la calidad de explotación del sistema adecuándose a la tecnología disponible. Estos criterios no son los únicos que definen el eje de una línea tranviaria, sino que complementan el proceso de toma de decisiones. El recorrido de una línea es el resultado de la consideración de diversos aspectos.

Un proyecto de transporte colectivo en superficie conlleva una remodelación de las vías por las que discurre. Su ámbito de influencia no sólo está circunscrito a dichas vías, sino también a su entorno más próximo. Para apreciar el impacto de la inserción urbana del tranvía, se puede equiparar el espacio público a un ecosistema, donde cualquier modificación de un parámetro cambia el estado de equilibrio global. La mayor parte de proyectos tranviarios se desarrollan en ecosistemas ya creados; con el objeto de llegar a un nuevo equilibrio es necesaria la concertación de los diferentes agentes del ecosistema. Por último, cabe recordar el carácter difícilmente reversible de la mayor parte de intervenciones de esta índole.

El impacto de la implantación de un sistema tranviario debería estar alineado con la consecución de una serie de propósitos relacionados con la mejora de la calidad de vida de los habitantes. Se persigue contribuir a dar respuesta a los derechos de los ciudadanos relacionados con la movilidad y al desarrollo del entorno comunitario.

Las reflexiones efectuadas hasta el momento nos llevan a un diseño de las redes tranviarias que contemplen las necesidades y limitaciones de los diferentes usuarios de la vía así como la previsión de la evolución de los usos del espacio público.

A nivel de infraestructura, los elementos angulares de este estudio se resumen en:

- Plataforma: grados de segregación, posición, tipos de separación y acabados superficie
- Cruces de peatones
- Intersecciones
- Señalización
- Paradas y estaciones

El diseño e interrelación de estos elementos han de estar enfocados a:

- Conseguir la mayor calidad de explotación del sistema.
- Presentar una imagen del sistema tranviario que invite a su utilización.
- Integrar las diferentes funciones técnicas.
- Conseguir la legibilidad del espacio.

4.1.2. Usos de la vía

La repartición y geometría de la vía pública es un reflejo de sus usos. Desde el punto de vista de la movilidad, la entendemos como el espacio destinado a permitir el movimiento de los peatones, ciclistas, automóviles y medios de transporte colectivo. Así la vía puede estar constituida en cada caso por aceras, zonas peatonales, carriles bici, carriles de circulación general y plataformas reservadas de transporte público en superficie, así como medianas y bandas de estacionamiento. En la foto 4.1 se puede apreciar la diversidad de usos del espacio público.

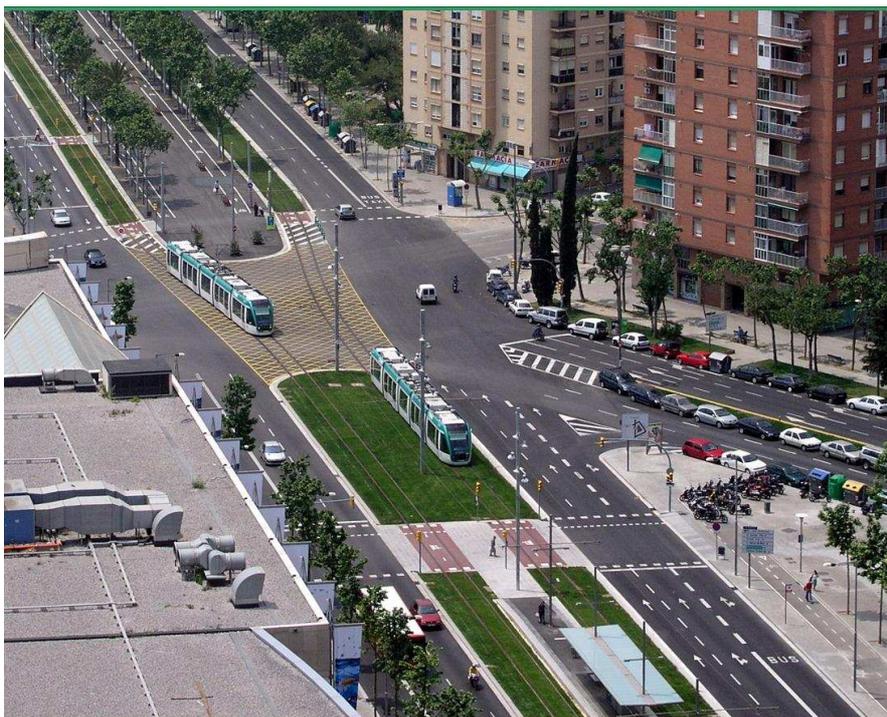


Foto 4.1 Repartición de la vía pública según sus usos, Barcelona.
(Fuente: TRAM)

Durante las últimas décadas la vía pública se ha repartido fundamentalmente entre peatones y automóviles. Dada la creciente necesidad de transporte público y el creciente uso de la bicicleta, es necesario reequilibrar el espacio público para dar cabida a los diferentes usuarios, es decir, hace falta una transformación de la movilidad urbana.

Los usos y formas de la vía están claramente interrelacionados. El espacio urbano se ha ido creando por capas a lo largo de la historia, de manera que sus formas son reflejo de la evolución de los usos que ha tenido la vía. Resulta bien conocido que en cascos urbanos antiguos el espacio está generalmente a escala del peatón, resultando una geometría restrictiva para la inserción del tranvía.

Podríamos pensar como más adecuadas las vías concebidas para el automóvil; sin embargo, estas suelen tener el inconveniente de haber olvidado al peatón, el cual es esencial para un transporte público. La visión histórica de la evolución acumulativa de las formas y usos es un complemento para conocer mejor el espacio actual.

4.1.3. Usuarios de la vía

Tal y como se ha mencionado anteriormente, la clasificación de los usuarios de la vía según su modo de desplazamiento sería: peatón, ciclista, transporte público, automóvil. Cabe destacar que el orden de prioridad no es el mismo en todos los países.

Peatón

Uno de los integrantes básicos del sistema viario es el peatón y es precisamente el más vulnerable. El riesgo de que se produzca un accidente está relacionado con sus características y comportamiento en la vía pública: se desplaza más lentamente, tiende a buscar los trayectos más fáciles y directos, y es imprevisible. Su comportamiento esperado está ligado a la cultura y hábitos de los que forma parte.

Ciclista

Tiene un comportamiento similar al del peatón, sólo que la velocidad y espacio ocupados son mayores. La cohabitación con los peatones y automóviles no suele ser fácil. Se constatan puntos conflictivos en las paradas de transporte público y con los vehículos estacionados.

Transporte colectivo

El usuario de transporte público también es peatón, y en ocasiones ciclista. En general, el transporte público sigue unas pautas determinadas. De cara a mejorar sus prestaciones, es recomendable que disponga de un espacio propio en la vía pública, espacio que por lo general le resta al automóvil. En vista de su mayor envergadura, el espacio requerido para circular es mayor. Debe disponer de puntos de confluencia con el peatón.

Automóvil

Es el modo de transporte con mayor ratio de área ocupada por persona, siendo el principal agente causante de la congestión en el viario. Está sujeto a unas normas de circulación general. No obstante, su comportamiento está ligado a la cultura y hábitos de los que forma parte el conductor. Conjuntamente con el peatón y los ciclistas, es el modo de transporte que reporta más accidentes.

4.2. INSERCIÓN DE LA PLATAFORMA EN LA VÍA PÚBLICA

4.2.1. Grado de segregación

El grado de segregación de la plataforma es un punto fundamental de un proyecto de tranvía: repercute en la explotación del sistema, en el aspecto global, en la redistribución de los usos del espacio público, etc. Una elección desacertada puede conducir al fracaso del sistema tranviario.

Tal y como se explica posteriormente, la opción predominante es la plataforma reservada con separadores físicos no franqueables, cuyo grado de segregación es máximo. Se trata de una solución que genera discusión en vista de la intensa movilidad urbana, que suele ocupar buena parte del espacio disponible. La plataforma reservada necesita parte del espacio antes ocupado

por otros usuarios, generalmente los automóviles, generándose un conflicto de intereses. La ciudad debe entonces decidir qué tipo de movilidad urbana necesita.

Plataforma compartida

La plataforma está integrada en el viario y por ella pueden circular habitualmente otros usuarios de la vía. Como bien se sabe, es la configuración empleada por los sistemas antiguos de tranvía.

La calidad de explotación ofrecida depende de forma sustancial de las medidas de regulación aplicadas. Sin una ordenación apropiada se crearían conflictos con el resto de tráfico ofreciendo un nivel de servicio inferior al de los autobuses, que pueden maniobrar mejor.

En lugares en los que la cultura y hábitos de los habitantes están adaptados a la circulación de tranvías por la vía pública, incorporando reglas de circulación del tráfico adecuadas se puede alcanzar un estado operacional seguro y relativamente eficiente, tal y como sucede en las ciudades de Zurich y Ámsterdam.

El uso de tranvías en zonas peatonales es una práctica común en muchas ciudades y según la UITP (2003) las experiencias están siendo favorables. En estas zonas la prioridad la tiene el peatón. Por motivos de seguridad, claramente la velocidad de circulación debe ser reducida (< 25 – 30 km/h), empeorando el nivel de servicio. Con el mismo fin, el mobiliario urbano no puede constituir un obstáculo a la visibilidad del conductor del tranvía. No hay que olvidar las personas de movilidad y visibilidad reducida. Las medidas a adoptar en este sentido van desde colocar la plataforma a una cota inferior con pequeñas rampas como bordes, o disponer una textura diferenciada del revestimiento tal y como se muestra en la foto 4.2.



Foto 4.2 Acabados de la superficie diferenciados en zona peatonal, en el centro de Berlin. (Fuente propia)

El uso compartido de la plataforma entre bus y tranvía es complicado pero posible si se da solución a una serie de exigencias. Se debe compatibilizar la explotación de un sistema con otro (frecuencias, paradas, etc.). La fiabilidad de las operaciones es alcanzable si la explotación conjunta la realiza un mismo operador. En lo que concierne a la sección tipo, la búsqueda de la solución debe contemplar el distinto comportamiento cinemático de los vehículos.

Plataforma reservada

En esta categoría se incluyen las plataformas integradas en la vía pública únicamente ocupadas por el tranvía excepto en algunas intersecciones reguladas por donde pueden cruzar los otros vehículos. Otra característica es que están protegidas mediante algún tipo de separación.

Las circunstancias que llevan a la adopción de una plataforma reservada en vez de compartida se sustentan principalmente en el aumento del flujo de automóviles. Son las mismas que propiciaron la desaparición del tranvía en muchas ciudades con el desarrollo masivo de la automoción.

Cuando el flujo es elevado, situación habitual en la actualidad, las medidas de regulación son insuficientes y la fluidez de circulación de los vehículos tranviarios se ve afectada negativamente por cada perturbación y obstrucción del tráfico privado; ver foto 4.3.



Foto 4.3 Congestión del tráfico afecta al tranvía, Lisboa.
(Autor: F. Carrasco)

El tranvía debe ajustar su velocidad a la del tráfico existente en ese momento, aumentando los tiempos de recorrido. Además, los vehículos que paran o estacionan a menudo estorban la circulación del tranvía y la seguridad se ve disminuida en vista de los movimientos imprevistos de los conductores al maniobrar. Todo esto da lugar a accidentes que producen importantes daños.

Fácilmente se deduce que el objetivo de mejorar la explotación pasa por una reducción sustancial de los impedimentos a la circulación por parte de otros vehículos. Y este es

precisamente el objetivo de la plataforma reservada. Una posible configuración es la mostrada en la foto 4.4.

En la actualidad, la plataforma reservada es la configuración más utilizada. Sus ventajas son:

- Para el viajero: ofrece la posibilidad de circulación rápida y regular que se traduce en una disminución de los tiempos de viaje y una mayor puntualidad, aspectos muy apreciados. Además, la seguridad y confort durante el trayecto y en el acceso se ven mejorados. El tranvía se convierte en una alternativa competitiva al vehículo particular.
- Para la comunidad: el establecimiento de nuevos sistemas tranviarios supone una oportunidad de regeneración urbanística del ámbito en que se encuentra enmarcado. Se crean zonas verdes, se renueva el mobiliario urbano, las aceras, etc. Por otro lado, el impacto ambiental de los tranvías es inferior al de los vehículos a motor. En definitiva, las zonas por las que discurre el tranvía se revalorizan y modernizan.
- Para el explotador: permite disminuir el coste de explotación de la red para una frecuencia determinada. Aumentar la velocidad comercial conlleva una disminución de vehículos en la línea y por lo tanto de conductores.

Es importante señalar que para poder aprovechar estos beneficios se deben tomar medidas paralelas de prioridad en las intersecciones.



Foto 4.4 Plataforma reservada, Montpellier. (Autor: F. Carrasco)

Plataforma independiente

Este nivel de segregación se consigue a través de estructuras elevadas y túneles. Se trata de una configuración más bien propia de otros sistemas guiados. El funcionamiento operacional se independiza de las vías urbanas, resultando en una mayor calidad de explotación. Como inconvenientes podemos destacar las mayores distancias a recorrer para acceder al servicio o el elevado coste.

La visión que se ha tenido hasta ahora de las estructuras elevadas es negativa. Normalmente han sido utilizadas en sistemas rápidos de ferrocarril por lo que el ruido producido es considerable y la estructura necesaria pesada y, en general, poco estética. En el caso de tranvías, la situación es menos desfavorable. Nótese que el ruido producido sería inferior y la estructura necesaria más ligera. Aún así, el impacto medioambiental seguiría siendo fuerte. El posible ámbito de aplicación es: calles muy anchas, zonas interurbanas en las que hay numerosos obstáculos como carreteras, ríos, etc. Actualmente su uso es reducido, aunque de cara al futuro puede que sea la alternativa a la falta de espacio en las calles y el subsuelo de las ciudades.

El túnel es la infraestructura utilizada por el metro y otros sistemas ferroviarios en su penetración en las urbes. También se recurre a ellos en algunos tramos de las redes de tranvía. Proporcionan un nivel de segregación total, incluso de las inclemencias del tiempo. Esto se traduce una elevada fiabilidad. La contrapartida es su elevado coste de construcción. En redes tranviarias se puede plantear su uso en zonas en las que el espacio disponible en superficie es insuficiente y en las que la demanda lo justifique.

4.2.2. Posición de la plataforma

La plataforma tranviaria suele tener una posición central (foto 4.5a). También es posible la posición lateral (foto 4.5b) y la posición bilateral. En la elección de un tipo u otro de configuración intervienen diversos factores.



Fotos 4.5 a) Izquierda: posición central, Montpellier. **b)** Derecha: posición lateral, Tenerife. (Autor: F. Carrasco)

La anchura disponible es uno de ellos. En la medida en que los separadores serán considerados necesarios, es evidente que la anchura necesaria para las plataformas axiales y bilaterales es mayor que las unilaterales. Otro punto a considerar es el de las estaciones. En general, si la vía del tranvía discurre junto a las aceras, estas se pueden aprovechar para alojar parte de la estación.

Un factor decisivo es, o debería ser, la calidad de explotación del sistema ofrecida. Adoptando este punto como criterio de referencia, la mejor ubicación es sin duda la central. Varios argumentos permiten realizar esta afirmación. Primero, los conflictos con el resto de tráfico sólo aparecen con los giros a la izquierda. Por otro lado, en el caso de incidencia en alguna de las dos vías, las configuraciones central y lateral permiten que el servicio continúe con relativa normalidad.

En vista de las reflexiones efectuadas, si la anchura es suficiente, la opción preferible es la posición central. La configuración bilateral es poco recomendable. Presenta desventajas significativas en la explotación del sistema. Además, es más extravagante en términos de material y espacio utilizados, aumentando los costes.

De todas formas, es positivo incorporar más criterios en el proceso de decisión. El CERTU (2000) propone las siguientes reflexiones complementarias relacionadas con las características del entorno contiguo:

- la presencia de una fuerte densidad de viviendas o de actividades comerciales por un lado de la vía, y muy poca del otro lado, es un hecho que favorece una localización unilateral del tranvía del lado de la fuerte actividad
- sin embargo, si hay numerosos puntos de acceso de un lado (parkings, estaciones de servicio...), la implantación lateral en el lado opuesto sería mejor
- atendiendo a problemas de ruido y vibraciones es preferible ubicar la plataforma en el lado opuesto de las viviendas
- si existe equilibrio entre las actividades a ambos lados de la vía, o si existen simetrías visuales preponderantes (continuidad edificios, alineaciones de árboles...), se impone la posición axial, y ocasionalmente la bilateral
- la plataforma axial, facilita el servicio a los edificios adyacentes, quedando la circulación general directamente en contacto con las actividades laterales: no se penaliza la parada o acceso de los vehículos a los edificios ni la entrega de mercancías, se facilita la recogida de basuras y el acceso de los vehículos de emergencia, y por último, no aumenta la distancia a recorrer entre la zona de estacionamiento de vehículos y las actividades laterales

4.2.3. Tipos de separación

Los separadores permiten delimitar los espacios. Se emplean con el fin de guiar los vehículos y disuadir a otros usuarios de invadir la plataforma, aumentando el nivel de seguridad y la calidad de explotación del sistema. También contribuyen a la legibilidad del espacio urbano.

La separación visual a través de marcas viales conjuntamente con el uso de colores y texturas diferenciados permite delimitar la plataforma de una forma sencilla. Hay situaciones en las que resulta muy útil para delimitar el gálibo, como por ejemplo en intersecciones o zonas peatonales.

La separación física se puede conseguir mediante, en orden creciente de impermeabilidad, una diferencia de cota entre la plataforma y la calzada, bordillos de mayor o menor anchura y/o altura, barreras metálicas o vegetales. Se pueden clasificar en tres categorías: 1) franqueable por todos los usuarios, 2) franqueable sólo por peatones, 3) infranqueable. Estas formas de demarcación pueden ser complementadas o sustituidas, si hay suficiente espacio, por franjas laterales de vegetación contribuyendo a la visibilidad y estética de la plataforma. A modo de ejemplo, ver fotos 4.6 a, b y c.



Fotos 4.6

- a) Izquierda superior: barrera metálica, Orleans. (Autor: F. Carrasco)
- b) Derecha superior: bordillo, Barcelona.
- c) Inferior: franja lateral vegetal, Barcelona. (Fuente propia)

La elección del tipo de separación depende del espacio disponible, la imagen deseada para el espacio público y el respeto de la plataforma por el resto de usuarios.

En relación con el espacio disponible, cabe señalar que los separadores físicos tienen una dimensión pequeña, por lo que este aspecto no constituye un factor determinante.

De cara a la imagen, es básico que la separación esté integrada con el resto de la infraestructura. De todas formas y como bien se sabe, el criterio estético tiene un carácter subjetivo y debería primar la funcionalidad.

En lo que concierne al respeto de la plataforma, podríamos hacer las siguientes reflexiones:

- Depende en gran medida de la altura del separador. En la bibliografía del CERTU se señala un valor de 8 cm como punto de inflexión para disuadir a los conductores de vehículos de invadir la plataforma.
- Respecto a los peatones, el número de pasos disponibles para cruzar la plataforma tiene una gran importancia. Si el peatón se ve obligado a caminar largas distancias para efectuar el cruce en los sitios indicados, es evidente que intentará atravesar la plataforma por donde le convenga.
- Otro aspecto a contemplar es la relación entre el tráfico de los distintos modos de transporte. Un emplazamiento con poco tráfico tranviario, en relación con el flujo de vehículos y personas, es más susceptible de ser invadido y por lo tanto requiere una mayor protección.
- Hay que tener en cuenta la cultura tranviaria de la población. Las ciudades en las que el tranvía ha existido durante un periodo de tiempo considerable y en las que es ampliamente aceptado, son más proclives a respetar la plataforma reservada.
- Aunque exista poco respeto, no se debe llegar a niveles demasiado rígidos de separación ya que puede ser necesario ocupar la plataforma con otros vehículos (mantenimiento, emergencias, etc.), pueden dificultar la visibilidad entre los diferentes usuarios de la vía y, además, disminuir la integración del tranvía en la trama urbana.

4.2.4. Acabado de la superficie

Es importante exigir que el revestimiento de la plataforma resista, sea fácil de mantener y que al mismo tiempo tenga una funcionalidad visual, o ambiental.

En la elección del acabado de una plataforma compartida se deben tener en cuenta los diferentes tipos de solicitaciones a los que se ve sometido la plataforma y las necesidades de los usuarios que circulen por ella.

En plataformas reservadas, es recomendable hacer la superficie en un material diferente al de la calzada. Esto permite delimitar el gálibo y dar una identidad propia a la plataforma que disuada a peatones y otros vehículos de invadirla. Juntamente con el uso de separadores, se obtiene una notable mejora de la seguridad. Obviamente, en las intersecciones la superficie será la misma de

la calzada pero señalizada adecuadamente para que no esté ocupada por vehículos particulares al paso del tranvía. De la misma forma, el revestimiento en los cruces de peatones debe ser el apropiado para facilitar la percepción del mismo por el peatón. En la foto 4.7 se puede apreciar el cambio del revestimiento de una plataforma en función del uso.



Foto 4.7 Cambio del revestimiento de la plataforma en función de su uso, Barcelona. (Fuente propia)

El acabado superficial de la plataforma marca claramente la apariencia global de un sistema tranviario; su elección se enfoca en parte a conseguir una apariencia lo más atractiva posible. Una práctica que persigue dicho objetivo es la utilización del acabado en hierba. Para que funcione es indispensable garantizar un mantenimiento adecuado. De lo contrario, se produce el efecto opuesto al buscado y podría empeorar la seguridad al reducirse la visibilidad de las vías. La complejidad se ve aumentada por la necesidad para la hierba de un sistema de riego que debe ser compatible con el resto de instalaciones. No obstante, el criterio de funcionalidad visual es abierto e igualmente se pueden conseguir buenos resultados con otros materiales (fotos 4.8).



Fotos 4.8 a) Izquierda: revestimiento en hierba, Barcelona. (Fuente propia), **b)** Derecha: revestimiento en adoquines, Orléans. (Autor: F. Carrasco)

Un criterio adicional a los mencionados hasta ahora es el del ruido emitido. Se han llevado a cabo estudios sobre las emisiones de ruido producidas con el paso del tranvía en varias ciudades europeas. Según datos recopilados por la UITP (2003), los mejores resultados se obtuvieron en las plataformas revestidas con hierba. A la hora de interpretar los resultados, se debe tener en cuenta que los fenómenos que participan en la creación de ruido son diversos. Según el CERTU (2009), el acabado en hierba de la plataforma aporta una disminución del nivel global de ruido emitido por la circulación de tranvías en una línea del orden de 3 a 5 dB(A) en comparación con la circulación en la misma línea sobre plataformas en materiales minerales.

4.3. INTERACCIÓN CON OTROS USUARIOS DE LA VÍA

Una de las características de los sistemas de tranvía moderno es que la plataforma puede ser atravesada al mismo nivel por otros usuarios, tales como peatones, automóviles, buses o bicis. En los cruces se da la mayor interacción entre usuarios y por ello constituyen uno de los puntos más conflictivos. El enfoque que se le debe dar a su tratamiento es cubrir la necesidad de cruce de la vía en buenas condiciones de seguridad a la vez que se interfiere lo menos posible la circulación del tranvía.

Con el fin de minimizar el riesgo de accidentes, es necesario diseñar los elementos contextuales de los cruces teniendo en cuenta el comportamiento de los diferentes usuarios de la vía, abordado en el apartado 4.1, e intentando que el conjunto de elementos sea fácil de interpretar.

4.3.1. Cruces de peatones

Como se ha indicado con anterioridad, la imprevisibilidad de los peatones confiere gran complejidad al cruce de la vía, haya plataforma reservada o no. Ésta se ve agravada por las siguientes circunstancias:

- Circulación densa de automóviles.
- Frecuencia de paso del tranvía elevada.
- Velocidades elevadas.
- Numerosas vías a atravesar.
- Condiciones de visibilidad insuficientes.
- Superficie de la plataforma deteriorada.

Designación de los puntos de cruce

El objetivo de disminuir las interferencias, que afectan negativamente a la explotación, pasa por el acotamiento de los puntos de cruce de la plataforma. Obviamente, se deben colocar cruces de peatones en las estaciones para permitir el acceso a las mismas; la función del cruce se puede ampliar si la estación se ubica en las inmediaciones de una intersección.

Sabemos que los recorridos naturales del peatón se efectúan de cara a la mayor rapidez y comodidad. Por consiguiente, los sitios designados para los cruces deberían ser percibidos por el peatón como los que mejor satisfacen sus requerimientos y no estar excesivamente distanciados. De esta forma, se intenta disuadir a los peatones de atravesar la vía en los tramos no indicados a este fin.

Los separadores físicos de la plataforma buscan el mismo objetivo. Por ejemplo, una barrera es un buen elemento disuasorio. Una medida más sutil es la de jugar con la anchura de los bordillos. Resultan de interés las reflexiones indicadas en la bibliografía del CERTU (2000): un bordillo necesita como mínimo 1 metro de anchura para poder servir de refugio; si no es posible implantar un separador con esta característica, es preferible colocar un bordillo de poca anchura (máximo 30 centímetros), que en general no sería percibido como una posibilidad de refugio.

Geometría de los pasos de peatones

A la hora de diseñar el cruce, se debe tener en cuenta la distancia a recorrer por el peatón, la presencia o no de señalización luminosa, la posibilidad de colocar refugios así como la percepción que tenga el peatón del espacio real ocupado por el tranvía a su paso.

Son de interés las recomendaciones indicadas por el CERTU (2000) en este sentido:

- La distancia mínima a recorrer por el peatón suele ser de 9 metros; el cruce se debería efectuar en dos tiempos asegurando refugios para peatones de anchura como mínimo, en condiciones normales, de 2 metros, y de forma excepcional, 1,5 metros (medidos a partir del GLO).
- En ausencia de señalización luminosa, si no hay posibilidad de refugio de anchura superior a 1,5 m, es preferible no colocar cruce de peatones.
- En caso de señalización luminosa, el tiempo del ciclo debe ser suficiente para efectuar el cruce.
- Es importante materializar el gálbo de alguna manera (diferencia de color y textura de los materiales, ligero desnivel,...).

Cabe señalar que la anchura para el refugio propuesta es bastante generosa, siendo difícil su implantación en vías con escaso espacio. Entonces toca recurrir a refugios más estrechos. A título indicativo, el tranvía de Barcelona tiene refugios de 1,20 m de anchura.

Paralelamente a la implantación de refugios, se han de tomar las medidas adecuadas para marcar el itinerario a seguir por los peatones, tales como barreras, señalización o pavimentos diferenciados, y dotar de rampas los diferentes elementos con el fin de facilitar la accesibilidad a las personas de movilidad reducida. Las fotos 4.9 muestran dos tipos de señalización utilizados en un mismo paso de peatones.



Fotos 4.9 a) Izquierda: señalización horizontal, **b)** derecha: señalización vertical en paso de peatones, Barcelona. (Fuente propia).

Pasos de peatones en tramos alejados de intersecciones

Esta práctica sería necesaria en el caso de que la distancia entre los cruces ubicados en las intersecciones fuese demasiado grande, situación que afecta negativamente los recorridos de los peatones.

Si no queda más opción que la de materializar el cruce, es aconsejable colocar refugios para peatones como los indicados en la figura 4.1. Estos se pueden implantar ocupando una parte de la calzada y resultando infranqueables para los vehículos. Mediante esta configuración se consigue una mejor percepción del cruce por parte de los conductores de automóviles y, a la vez, una disminución de su velocidad.

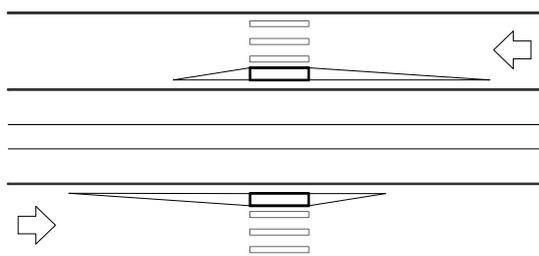


Figura 4.1 Refugio para peatones.

Una medida que aumenta la seguridad, aunque también el recorrido a caminar por el peatón, es la de marcar un itinerario que lleve al peatón a mirar de frente al peligro, formando una especie de *chicane* o cruce en Z (foto 4.10). También resulta de utilidad en los cruces de peatones en intersecciones.



Foto 4.10 Cruce en Z, Calgary. (Fuente: TCRP ,1996)

Una concentración de peatones elevada – como en los accesos a un colegio –, una mala visibilidad y/o un flujo denso y rápido de vehículos son situaciones que justificarían el control semafórico de un cruce de peatones.

Pasos de peatones en plataformas compartidas

Por lo que respecta a los cruces de peatones en plataformas compartidas con otros vehículos, no es aconsejable el establecimiento de refugios en el eje de poca anchura, como por ejemplo el de la foto 4.11. Las condiciones de seguridad no son suficientes.



Foto 4.11 Refugio para cruce de peatones en plataforma compartida en Nantes. Práctica a evitar. (Fuente: Google Earth, 2009)

Pasos de peatones en estaciones e intersecciones

Las estaciones se caracterizan por la velocidad reducida de los vehículos y el gran flujo de viajeros a su alrededor, que además muestran un comportamiento de precipitación hacia el andén con la llegada del tranvía y de salida en masa. En este contexto es de esperar que no se respeten las reglas. Este hecho se debe considerar en la fase de proyecto y, sobretodo, durante la explotación.

En el diseño de los cruces en estaciones alejadas de las intersecciones resulta interesante el siguiente caso. Si existen carriles de circulación general contiguos a la plataforma regulados con semáforos de pulsado de botón, es imposible coordinar sus ciclos con la llegada y salida de tranvías. El peligro es que el peatón, al ver la señal verde, puede interpretar que se aplica a toda la vía y atravesar la plataforma sin mirar. Una solución a este problema es que la alineación del cruce de la plataforma no coincida con la del resto de carriles (ver figura 4.2).

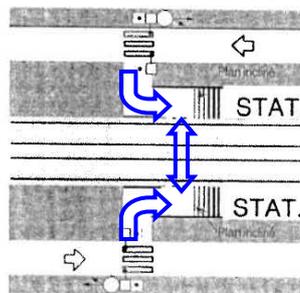


Figura 4.2 Estación en la que los pasos de peatones de los carriles de circulación general están regulados con semáforo pulsado (Fuente: CERTU, 2000)

La ubicación de las paradas al lado de las intersecciones es la más provechosa; el cruce para peatones sirve tanto a la parada como a la intersección. Los pasos de peatones se implantan en el extremo de las rampas de acceso al andén y del lado más cercano a la intersección, obligatoriamente disponen de refugios. Suelen estar controlados por semáforos. En la figura 4.3 podemos apreciar la disposición habitual de los pasos de peatones en las intersecciones.

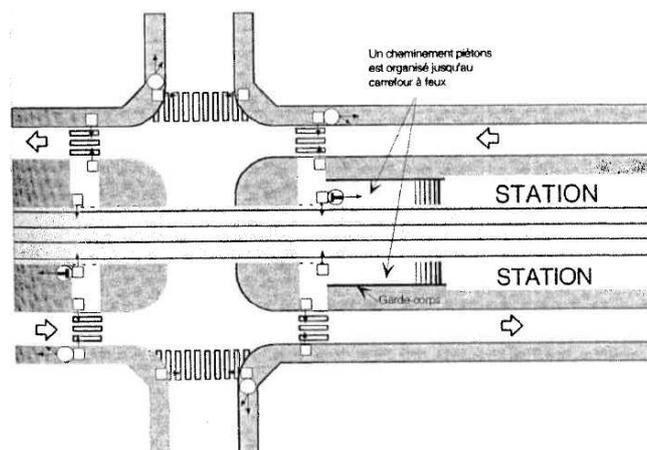


Figura 4.3 Disposición habitual de los pasos de peatones en las intersecciones con estación. (Fuente: CERTU, 2000)

Es recomendable que los cruces de peatones en intersecciones, sin parada de tranvía, dispongan de refugio. En casos de poco flujo de vehículos y peatones, se puede perfectamente prescindir de ellos. Pero si hay circunstancias agravantes como las mencionadas al principio del apartado 4.3.1, sería necesario el establecimiento de refugios con o sin señalización luminosa. Si se prevé imposible la implantación de refugios por falta de espacio, se puede optar por materializar un cruce sin refugios con una regulación semafórica tal que permita atravesar la vía en un solo tiempo.

4.3.2. Intersecciones

Resulta bien conocido que las intersecciones son uno de los puntos más complejos de un sistema tranviario. En ellas se pueden dar una gran cantidad de operaciones: cruces de peatones, paradas de tranvías, cruces y giros de diversos vehículos.

Suelen ser los tramos de la línea causantes de los tiempos muertos en la circulación del tranvía. Adoptando como criterio de referencia la calidad de explotación del sistema, la situación ideal es aquella en la que el tranvía no se debe parar a su paso por la intersección.

Cabe preguntarse si es posible proporcionar prioridad al tranvía en todas las intersecciones. La realidad es que la vía pública debe dar cabida a diferentes tipos de usuarios, cada uno con sus necesidades y limitaciones. Por lo tanto, nos ceñiremos a la búsqueda de soluciones que proporcionen el máximo nivel de prioridad al tranvía dentro de lo posible.

Un requisito elemental es la seguridad. Los principales factores que influyen en el nivel de seguridad buscado son: la señalización, las barreras y refugios, la elección del número y lugar de cruces permitidos, la organización de los carriles, el nivel de segregación de la plataforma.

También tiene un papel primordial en la seguridad el hecho de que la plataforma sea compartida o reservada. Claramente el tratamiento de las intersecciones es más sencillo en plataformas reservadas.

La consecución práctica de los objetivos expuestos pasa indiscutiblemente por la reducción del número de cruces permitidos, pero sobretodo por la supresión de operaciones en los cruces que afecten a la prioridad del tranvía y la seguridad.

Si bien, para llegar a una solución realista, no podemos olvidar que el proceso de decisión debe enmarcarse en un contexto más amplio, en el que se tenga en cuenta los flujos de cada modo de transporte de las vías ubicadas en la zona de influencia de la línea.

Plataformas reservadas

En el tratamiento de las intersecciones resultan de interés las siguientes medidas:

1. Disponer de una superficie de la plataforma adaptada a la circulación de otro tipo de vehículos. Marcarla de forma que al paso del tranvía no esté ocupada por ningún otro usuario.
2. Establecer la señalización y barreras necesarias para guiar a los diferentes usuarios. En intersecciones en las que se permita el cruce, también sería necesaria la señalización luminosa.
3. Prohibir las maniobras en las que el vehículo atraviesa la plataforma partiendo de un carril paralelo a la vía. Por ejemplo, si la plataforma es central, prohibir los giros a la izquierda (foto 4.12).



Foto 4.12 Prohibición de giro a la izquierda para la circulación general.
(Fuente propia)

4. Tomar las medidas adecuadas si se decide permitir la realización de dichas maniobras. Éstas son:
 - Controlar la intersección mediante fases semafóricas y señalización.
 - Separar el carril, desde el que se va a girar, de la plataforma de forma que el vehículo quede en una posición con mejor visibilidad sobre la vía.
 - Si es posible, implantar un carril exclusivo para efectuar esa maniobra con el fin de no obstruir a los vehículos que siguen recto.

Ser conscientes que esta decisión implica la disminución de la calidad de explotación del sistema: el ciclo semafórico tendría tres fases, aumentaría el riesgo de accidentes. Por otra parte, la anchura necesaria sería mayor.

5. Implantar un sistema de detección de la presencia del tranvía con el objetivo de darle prioridad en las intersecciones. Mientras no se detecta presencia de tranvía, el cruce

funcionaría con las 2 o 3 fases para regular la circulación general. En cuanto se detecta el tranvía, el ciclo introduce la 'fase tranvía' y recupera el funcionamiento normal después de su paso.

A título orientativo, en el Anejo 3 se presenta la geometría y funcionamiento de algunas de las intersecciones más habituales.

Una vez contempladas las posibilidades que ofrecen las intersecciones convencionales, se puede analizar el interés de materializar la intersección mediante una rotonda. La rotonda presenta una serie de ventajas que la convierten en una alternativa muy válida:

- Mayor facilidad para la realización de los giros a la izquierda y giros en U.
- Adecuación a las intersecciones de más de dos calles.
- Reducción de los tiempos muertos.
- Simplificación del tratamiento de la prioridad al tranvía.

No obstante, es una solución que, como todas las demás, tiene sus límites. Primero de todo, requiere mayor espacio.

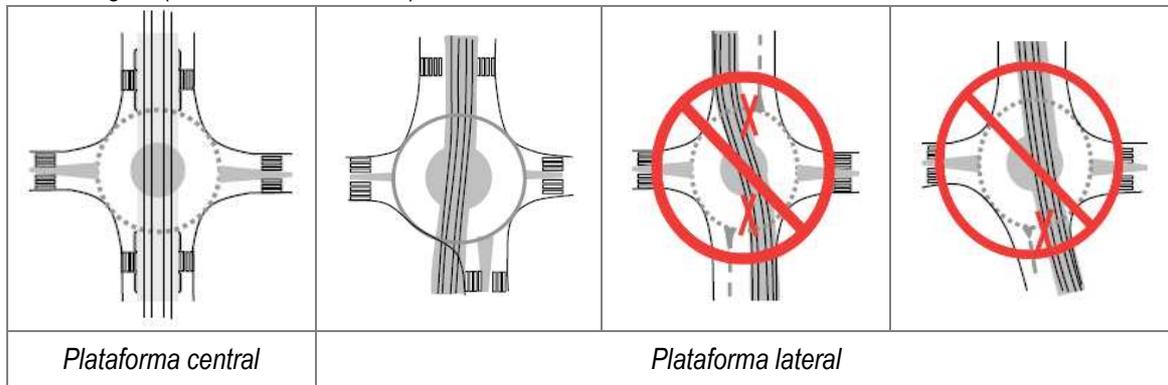
Por otro lado, en el caso de que el tranvía no cambie de dirección, la plataforma en posición central es la más evidente para la circulación general (ver foto 4.12). Las plataformas laterales requerirían medidas adicionales en términos de geometría, señalización y acabados de la superficie para mejorar su legibilidad y seguridad.



Foto 4.13 Posición central respecto la rotonda, Barcelona (Fuente propia)

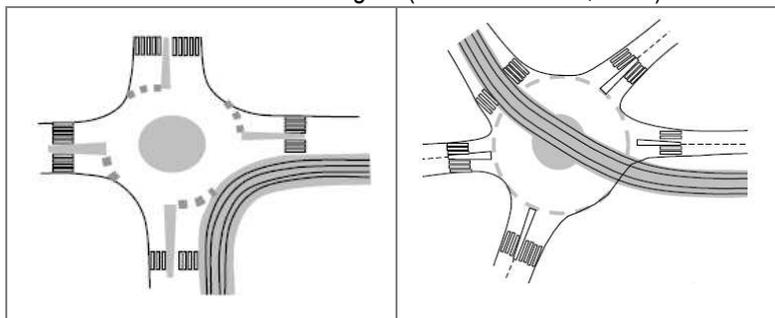
En el cuadro 4.1 se muestran las posiciones favorables y desfavorables de la plataforma en relación a una rotonda. Las posiciones desfavorables se deberían prohibir dado que implican un gran riesgo de accidentes. El vehículo que accede a la rotonda se enfrenta a dos conflictos simultáneos: los vehículos que circulan por el anillo y la plataforma tranviaria.

Cuadro 4.1 Idoneidad de las posiciones de la plataforma en relación a una rotonda. Caso: tranvía no efectúa giro. (Fuente: CERTU, 2008)



En cuanto a las rotondas en las que el tranvía sí que gira, en el cuadro 4.2 se indican posibles configuraciones.

Cuadro 4.2 Posibles posiciones de la plataforma en relación a una rotonda. Caso: tranvía efectúa giro. (Fuente: CERTU, 2008)



Plataformas compartidas

El tratamiento de la prioridad y seguridad con plataformas compartidas resulta algo más delicado. Por ejemplo, mientras el tranvía para, el resto de vehículos le pueden adelantar, de forma que dificultaría su prioridad en la intersección. Lo mismo pasa con los vehículos que desean girar a la izquierda y esperan en el mismo carril que acoge la vía.

De todas formas, el tratamiento para intersecciones de este tipo es básicamente el que se le daría si no hubiese tranvía. La intersección debe estar señalizada correctamente y, si es el caso, regulada mediante fases semafóricas. Si se desea favorecer la prioridad del tranvía, conviene prohibir las operaciones que obstruyan su paso tales como giros a la izquierda. Otras medidas que buscan el mismo objetivo son:

- Establecer la línea de parada de los vehículos no tranviarios antes de la zona de parada del tranvía y regularla mediante señalización luminosa. Cuando el tranvía se acerca para efectuar la parada, la señal se pone en rojo y entonces la zona de embarque/desembarque de viajeros quedaría libre (figura 4.4).

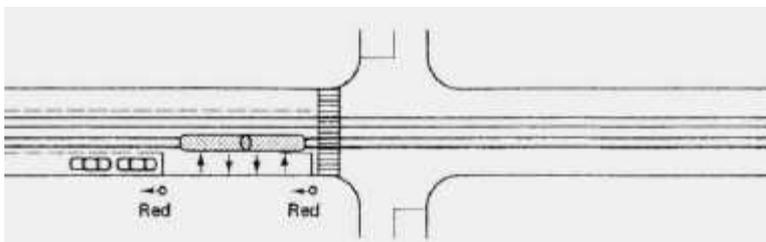


Figura 4.4 Sin andén. Zona de embarque/desembarque de viajeros despejada mediante señalización luminosa en plataforma compartida. (Fuente: Vuchic, 2006)

- Disponer de andén para la parada del tranvía, siempre que la anchura sea suficiente. Si el tráfico de pasajeros es voluminoso, regular mediante señalización luminosa el cruce entre la parada y la acera (figura 4.5).

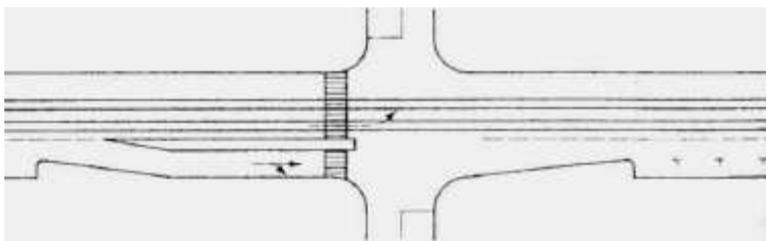


Figura 4.5 Andén de una parada de tranvía en plataforma compartida. (Fuente: Vuchic, 2006)

- Implantar un sistema de detección de la presencia del tranvía con el objetivo de darle prioridad en las intersecciones. Su funcionamiento sería similar al explicado para plataformas reservadas.

Implantación de obstáculos fijos cerca de una intersección

La colisión entre un automóvil y un tranvía en una intersección es poco probable si se toman las medidas adecuadas de seguridad. De todas formas, hay que considerar esa posibilidad y ver qué se puede hacer al respecto. La experiencia muestra que las consecuencias de un accidente pueden ser agravadas por la presencia de obstáculos fijos en el entorno próximo.

Las recomendaciones propuestas por el STRMTG (2007) en este sentido se ilustran mediante la figuras 4.6 y 4.7.

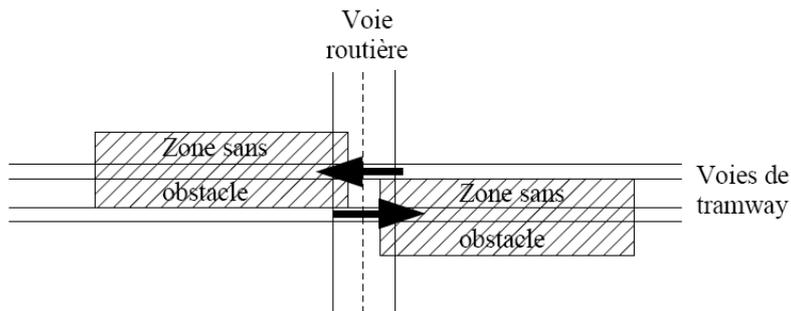


Figura 4.6 Zona libre de obstáculos fijos en las inmediaciones de una intersección. (Fuente: STRMTG, 2007)

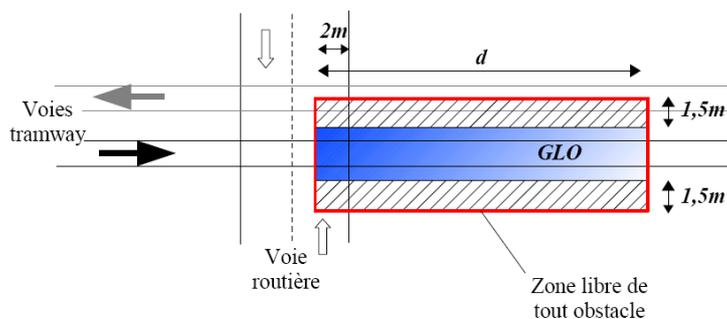


Figura 4.7 Dimensiones de la zona libre de obstáculos fijos en las inmediaciones de una intersección. (Fuente: STRMTG, 2007)

La dimensión d ilustrada en la figura 4.7 debería ser igual a la distancia de parada del tranvía.

4.4. PARADAS Y ESTACIONES

Las paradas y estaciones constituyen un punto de encuentro entre el viajero y el servicio. Son elementos de la infraestructura así como de la explotación. Su diseño debe tener en cuenta la accesibilidad y seguridad. Asimismo, deben contribuir positivamente en la imagen global de la red tranviaria.

En el capítulo 3 se hizo mención a las principales restricciones impuestas a los parámetros de trazado. En este apartado se abordan aspectos sobre la implantación de las paradas y estaciones en el entorno urbano que también incidan en el trazado de la línea.

4.4.1. Ubicación y tipologías

Ubicación

La ubicación de las paradas de tranvía obedece a criterios de satisfacción de la demanda y de explotación en el sentido de que paradas muy frecuentes disminuyen la velocidad comercial.

Un lugar muy ventajoso a nivel operacional es cerca de las intersecciones: los accesos a la estación coinciden con los cruces de peatones y, si se sitúa antes de la intersección, la parada del tranvía coincide con la parada previa a la intersección.

Un criterio adicional para la elección de la ubicación es la existencia de visibilidad recíproca entre los peatones y los conductores del tranvía.

Tipologías

El andén puede estar integrado en el viario o tener entidad propia, mediante una plataforma sobreelevada diferenciada.

En el primer caso, si el andén no está integrado en la acera, el peatón necesita protección adicional ya que comparte espacio con el resto del tráfico rodado. Por esta razón, la zona de parada debe estar debidamente identificada mediante marcas e indicadores. Se puede garantizar que la zona de embarque/desembarque de pasajeros quede libre mediante el uso de señalización luminosa. Es importante señalar que esta configuración dificulta el acceso al servicio a las personas de movilidad reducida; la accesibilidad es una de las ventajas que pretende ofrecer el tranvía moderno en oposición a otros modos de transporte.

En la medida de lo posible se intentará que el andén forme parte de una plataforma sobreelevada aún cuando esta medida implique la reducción de espacio para la circulación general. Es decir, evitar andenes como el de la figura 4.4. Se consigue aumentar la seguridad y facilitar la accesibilidad. Básicamente, se cuenta con dos tipos de andenes: centrales y laterales.

Los andenes centrales ahorran más espacio que los laterales, a no ser que estos últimos estén integrados en la acera (foto 4.14). No obstante, necesitan refugio para facilitar el acceso, con lo que la diferencia de espacio requerido es prácticamente insignificativa. Por otro lado, presentan el inconveniente de estar más alejadas a la hora de utilizarlas y de que, si el espacio es escaso, la trayectoria del tranvía sufre cambios en detrimento del confort del usuario.

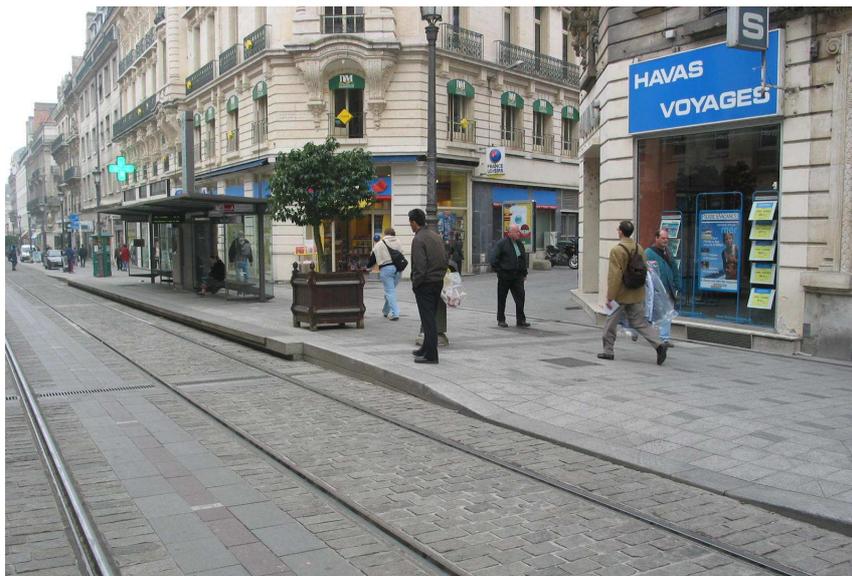


Foto 4.14 Andén lateral incorporado en la acera, Orléans. (Autor: F. Carrasco)

4.4.2. Características básicas

Dimensiones

La longitud de la estación está formada por la longitud del andén más las rampas de acceso. El andén viene determinado por la longitud de los vehículos que se emplearán durante la explotación más un margen de error.

La anchura es una de las variables que influyen en la posibilidad de inserción urbana de una estación. No sólo debe proporcionar suficiente espacio a los pasajeros, sino que también ha de tener en cuenta sus movimientos y la acumulación producida durante la espera.

A título orientativo, la UITP (2003) indica una anchura útil de 2 metros como mínimo y una anchura recomendable de 3 metros. Si la plataforma de la estación no está incorporada en la acera y queda elevada, con el fin de aumentar la sensación de seguridad de los pasajeros el mínimo recomendable es de 2,5 metros. Para la anchura de los andenes centrales, Zamorano et al. (2006) recomienda un valor de 3 metros como mínimo y 4 metros deseables.

La altura del andén se determina a partir del nivel de las puertas del tranvía buscando facilitar el acceso al vehículo. De cara a mejorar la accesibilidad y la inserción urbana es conveniente limitar esta altura. El uso de vehículos de plataforma baja proporciona alturas sobre el carril en el entorno de los 30 cm. El uso de plataformas de mayor altura es desaconsejable.

Accesibilidad

Es imperativo garantizar un acceso seguro y fácil en las interfaces acera/andén y andén/tranvía.

Se debería suministrar un acceso seguro y cómodo a todos, incluyendo a las personas de movilidad reducida. Si la plataforma es elevada se hace necesario el uso de rampas de acceso para acceder al andén. En el documento de la Office of Rail Regulation (2006) se recomienda un valor máximo de la pendiente de la rampa del 5%, y en casos excepcionales, del 8,5% siendo entonces conveniente la instalación de una barandilla. El *Codi d'accessibilitat de Catalunya* (1995) recomienda un valor máximo de 8% para rampas de longitud entre 3 y 10 metros. Por otro lado, se ha de garantizar el acceso a la parada mediante cruces de peatones en condiciones de seguridad.



Foto 4.15 Rampa de acceso al andén, Barcelona. (Fuente propia)

La interfaz andén/tranvía se concreta en el gap o distancia entre el límite del andén y el límite de la puerta del vehículo. A título indicativo, el *Codi d'accessibilitat de Catalunya* (1995) recomienda un gap máximo de 35 mm en sentido horizontal y 10 mm en sentido vertical para el acceso a ascensores. Para obtener gaps de esta magnitud es necesario que la estación coincida con una alineación recta del trazado de la vía.

Medidas adicionales

Los andenes y accesos deberían estar provistos de superficies podotáctiles y colores diferenciados, especialmente los bordes para que queden claramente definidos.

Si la plataforma de la estación está en contacto con los carriles de tráfico rodado serán necesaria barreras protectoras.

4.5. SECCIONES TIPO

La sección tipo es el resultado de la consideración de diversos aspectos:

- La anchura total de la vía.
- Los usos que soportará la vía pública, cada uno un espacio mínimo necesario.
- La configuración del entorno: tipo de edificación adyacente, cota de la fachada.
- Los flujos previstos de cada tipo de usuario y sus necesidades.
- El rango de pendientes transversales y desniveles permisibles.
- Aspectos paisajísticos.

Un proyecto tranviario no concierne únicamente a la plataforma del tranvía, sino que incluye toda la calle y su entorno.

Anchos

La anchura de la plataforma debe coincidir como mínimo con el gálibo libre de obstáculos más el espacio necesario para implantar las instalaciones fijas. A este valor se le añade la anchura correspondiente al tipo de separación que se utilice. La anchura total resultante presenta valores en el entorno de 6 a 8 metros.

Los carriles de circulación general presentan anchos mínimos de 3 metros y los carriles bus de 3,3 metros; es importante que el ancho de los carriles no sea ambiguo, es decir, que no lleve a los usuarios a tomar decisiones erróneas. Respecto al carril bici, toma valores de 1,5 a 2,5 metros. La anchura de espacio dedicado a estacionar depende de si se estaciona en línea o en batería.

En lo que concierne a las aceras, el ancho a disponer ha de procesar el flujo previsible de peatones. La anchura útil mínima necesaria para que dos personas de movilidad reducida se puedan cruzar es de 1,8 metros aproximadamente. De todas formas, no es recomendable el uso de aceras tan estrechas ya que afectaría negativamente la percepción del peatón; aumenta la sensación de incomodidad e inseguridad. Una práctica razonable es poner aceras de ancho a partir de 3 metros y mayor si el andén de la parada está integrado en la acera.

Pendientes transversales

La plataforma tranviaria siempre será horizontal en las alineaciones rectas. Respecto a las alineaciones curvas, ya se expuso en el apartado 3.2.4 la dificultad de inserción urbana del peralte. En este caso el perfil transversal es sencillamente el resultante de adaptarse al terreno.

En relación a las aceras y carriles, con el fin de que sean practicables se debe limitar su pendiente transversal. Por otro lado, también deben disponer de un mínimo de cara a garantizar el drenaje.

Respecto a los desniveles entre las diferentes partes de la vía, por motivos de seguridad no pueden ni muy acentuados ni nulos.

Ejemplos

A título indicativo se presentan algunas posibles secciones tipo para vías con anchos iguales o inferiores a 20 metros (figuras 4.8 a 4.11).

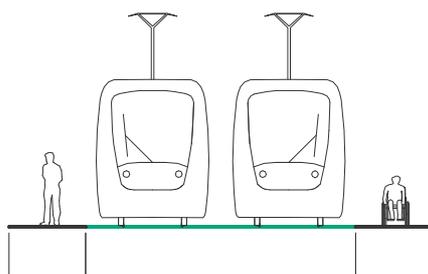


Figura 4.8 Posible configuración para calle con anchura ≈ 10 m: aceras, plataforma tranvía; vía doble.

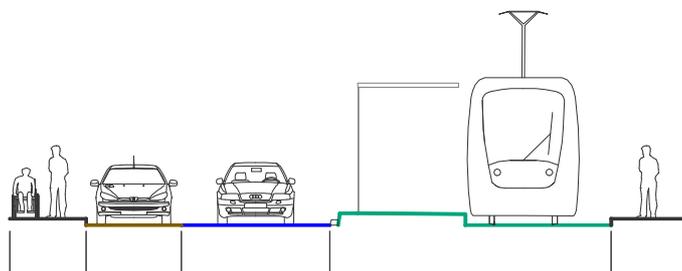


Figura 4.9 Posible configuración para calle con anchura ≈ 16 m: aceras, un carril, una banda estacionamiento, parada tranvía; vía única.

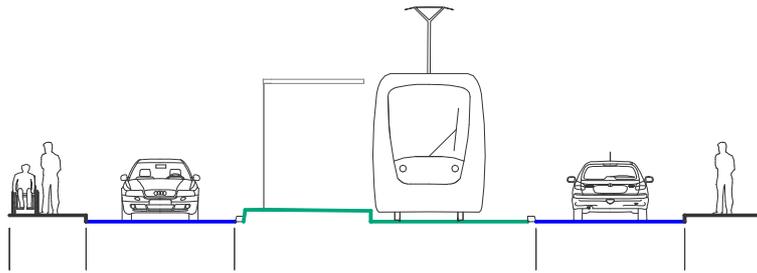


Figura 4.10 Posible configuración para calle con anchura ≈ 18 m: aceras, dos carriles, parada tranvía; vía única.

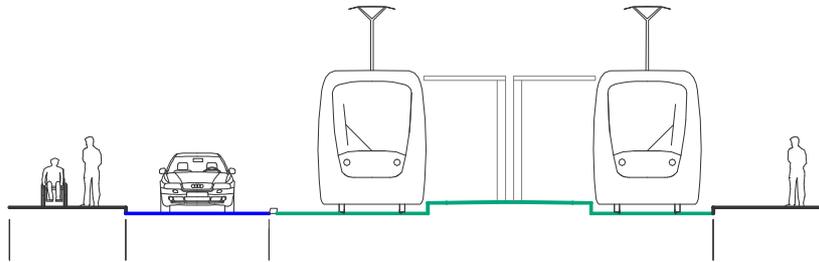


Figura 4.11 Posible configuración para calle con anchura ≈ 20 m: aceras, un carril, parada tranvía; vía doble.

5 . CONCLUSIONES

Fruto de la realización de la presente tesina, se han deducido diversas conclusiones que se exponen a continuación.

El uso de valores límite de los parámetros de trazado tiene consecuencias negativas sobre la explotación del sistema y los costes, y por ello sería deseable restringirlo.

Cabe señalar que la verdadera talla de un sistema tranviario se manifiesta durante su fase de explotación. Las posibles formas en las que la calidad de la explotación se puede ver afectada son: reducción de la velocidad comercial, empeoramiento del confort dinámico y acústico, y aumento del mantenimiento necesario. De todas formas, el confort percibido es una parte de la satisfacción total del cliente, no siendo el factor más determinante. Hay parámetros como la frecuencia y la velocidad comercial que priman por encima de él.

En relación con el segundo aspecto, los costes, las situaciones límite requieren vehículos de mayor potencia o con un diseño especial aumentando su coste. Este es el caso de curvas en S, pendientes o acuerdos verticales muy pronunciados. No obstante, la regulación del uso de valores límite no debería tener un carácter normativo sino orientativo. Especificaciones rígidas y uniformes son inapropiadas ya que pueden vetar soluciones que en determinados contextos serían razonables.

El trazado no se hace, sino que queda supeditado a la inserción urbana de la línea. En primer lugar, la línea debe satisfacer las necesidades de movilidad existentes que se traducen en los usos de la vía. Una herramienta muy útil a la hora de evaluar la idoneidad de un determinado corredor es la sección tipo. En ella se plasman la geometría y los usos de la vía. En lo que concierne a la geometría, las principales limitaciones son la anchura y la pendiente de las calles, y los radios de giro impuestos al tranvía.

Dentro de lo rígido, los sistemas tranviarios son bastante flexibles. Hay varios grados de segregación posibles: tramos en plataforma reservada, plataforma compartida, en túnel o elevados. Los acabados de la plataforma son variados: en hierba, en adoquines, etc. Y las formas de separación también. Las múltiples opciones que se presentan sirven para adaptar la identidad del sistema tranviario al entorno en el cual se inserta y, en consecuencia, convertirlo en un modo de transporte atractivo. Por otro lado, es un sistema extrapolable a zonas interurbanas que podría aprovechar las infraestructuras existentes de ferrocarril convencional.

En relación con el grado de segregación, la plataforma reservada ofrece mayores prestaciones operacionales que otras configuraciones. Sin embargo, también se pueden conseguir resultados razonablemente buenos con plataformas compartidas. Tampoco hay que descartar la posibilidad de uso de tramos cortos en túnel si con ello se evita un gran desvío de la línea.

En síntesis, la concepción del trazado en sistemas tranviarios viene determinada por diversos factores entre los que destacan las necesidades de movilidad de la población, la geometría de la trama urbana, la tecnología disponible, el nivel de confort deseable, el proyecto de explotación y los recursos económicos disponibles. El dar respuesta a los factores mencionados implica que el proyecto de trazado de una línea de tranvía no se trata simplemente de unir puntos concretos, sino que se enlaza de forma continua.

Finalmente, no hay que olvidar que la ciudad no se adapta al tranvía sino que el tranvía se debe adaptar a la ciudad.

6 . REFERENCIAS

CERTU.(2008), *Giratoires et tramways*. Lyon: CERTU Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques.

CERTU. (2000), *Guide d'aménagement de voirie pour les transports collectifs*. Collection 'Références - Aménagement et exploitation de la voirie' Lyon: CERTU Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques.

CERTU. (2009), *Plates-formes de tramway: pathologie et conception*. Volume 2. Collection Dossiers CERTU. Lyon: CERTU Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques.

Fundación de los Ferrocarriles Españoles. (2010), Ilustración: Tranvías y metros ligeros en España. *Revista Via Libre*. Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles n. 539.

Generalitat de Catalunya. (1995), *Codi d'accessibilitat de Catalunya*. Decret 135/1995. DOGC 28 d'abril de 1995.

Herce, M. (2009), *Sobre la movilidad en la ciudad*. Barcelona: Editorial Reverté.

Korve, H. W., Farran, J.I., Mansel D.M., et al. (1996), *TCRP Report 17: Integration of Light Rail Transit into City Streets*. Washington: National Academy Press.

Lòpez Pita, A. (2006), *Infraestructuras ferroviarias*. Barcelona: Edicions UPC.

Office of Rail Regulation. (2006), *Guidance on tramways*. Railway safety publication 2. London: Office of Rail Regulation (ORR).

Oromí, P. (2007), El Tranvía vuelve a Tenerife. *Revista Cimbra* n. 378.

Parsons, Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc. (2000), *TCRP Report 57: Track Design Handbook for Light Rail Transit*. Washington: National Academy Press.

Salmerón, C. (2009), *Els tramvies d'Europa. Crònica d'un retorn anunciat*. Barcelona: Carles Salmerón i Bosch.

STRMTG. (2007), *Guide d'implantation des obstacles fixes à proximité des intersections tramways/voies routières*. Saint-Martin d'Hères: STRMTG Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés.

UIC. (2006), *UIC Code 505-1 Railway transport stock - Rolling stock construction gauge*. International Union of Railways.

UITP. (2003), *Guidelines for selecting and planning a new light rail system*. Brussels: UITP International Association of Public Transport.

Vuchic, Vulkan R. (2007), *Urban transit. Systems and technology*. Pennsylvania: John Wiley & Sons, Inc.

Zamorano, C., Bigas J. M. and Sastre, J. (2006), *Manual de tranvías, metros ligeros y sistemas en plataforma reservada. Diseño, proyecto, financiación e implantación*. Madrid: Consorcio de Transportes de Madrid. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Otra bibliografía consultada

Comisión de transportes del CICCPC. (2008), *Sistemas de transporte en plataformas reservadas*. Madrid: Colegio de ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2008.

Esveld, C. *Modern Railway Track*. (2001), Netherlands: Edit Dior Zwarthoed-van Nieuwenhuizen, MRT Productions.

García, S. (2010), El tranvía: un medio de transporte en auge. *Cauce 2000* n.150, pp 6-15.

Karsety, G. (2009), *Guide pratique des VRD et aménagements extérieurs*. Paris: Editions Eyrolles.

Melis M, González FJ. (2008), *Ferrocarriles metropolitanos. Tranvías, metros ligeros y metros convencionales*. Colección señor 29. Madrid: Colegio de ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Miguel, G. (2003), El tranvía, una alternativa sostenible de movilidad urbana. *Cauce 2000* n. 116, pp 6-13.

Zamorano, C., Bigas J. M. and Sastre, J. (2008), Tranvías, Metros Ligeros y Sistemas en Plataforma Reservada. Puntos Clave Para Su Proyecto e Implantación. *Revista de obras públicas* n. 155(3), pp 59-74.

Páginas web

IATE. Página web InterActive Terminology for Europe. [www]. <http://iate.europa.eu/>

TRAM. Página web la empresa constructora y explotadora de los tranvías de Barcelona. [www]. <http://www.trambcn.com/>

UITP. Página web International Association of Public Transport. [www]. <http://www.uitp.org/>

ANEJO 1: TRANVÍAS MODERNOS EN CIRCULACIÓN EN ESPAÑA

CCAA	Población	Inauguración	Longitud (km)	Nº líneas	Ancho vía	Vehículo	
Andalucía	Sevilla Metro Centro	2007	1,3	1	1435	Urbos 2	CAF
	Sevilla Metro Ligerero L1	2009	18	1	1435	Urbos 2	CAF
	Vélez-Málaga	2006	6	1	1435	Urbos 2	CAF
Islas Canarias	Tenerife	2007	14,6	2	1435	Citadis 302E	Alstom
Catalunya	Barcelona Trambaix	2004	14,9	3	1435	Citadis 302	Alstom
	Barcelona Trambesòs	2004	14,3	3	1435	Citadis 302	Alstom
Euskadi	Bilbao	2002	4,9	1	1000	Urbos 1A/1B	CAF
	Vitoria	2008	7,1	2	1000	Urbos 2	CAF
Comunidad de Madrid	Madrid	2007	5,4	1	1435	Citadis 302	Alstom
	Madrid-Pozuelo-Boadilla	2007	22,4	2	1435	Citadis 302	Alstom
	Parla	2007	8,5	1	1435	Citadis 302	Alstom
Región de Murcia	Murcia	2007	1,7	1	1435	Citadis 302	Alstom
Comunitat Valenciana	Valencia	1994	20,7	3	1000	3800	CAF Meinfesa
						Flex Outlook	Bombardier
	Alicante	1999	52,4	3	1000	Tram-Tren	Vossloh-Alstom
						Flex Outlook	Bombardier

Fuente: Revista Vía Libre n. 539 (2010).

ANEJO 2: PARÁMETROS DE TRAZADO UTILIZADOS EN CIUDADES EUROPEAS

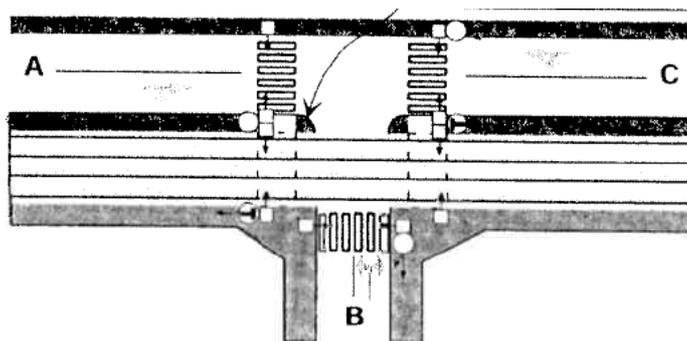
Parámetros		BERLIN	DUBLIN	ROUEN	TENERIFE
GENERAL					
Ancho de vía	mm	1435	1435	1435	1435
Radio mínimo	m	16	25	30	25
Curva de transición	-	clotoide	clotoide	clotoide	clotoide
Peralte máximo	mm	150	120	160	100
Rampa peralte máxima	mm/m	2,5	4	4	4
Insuficiencia peralte máxima	mm	150	100	157	-
Gradiente máximo L ≥ 250 m	%	5	6	7	7,5
Gradiente máximo excepcional L < 250 m	%	5	8	8	8,5
Gradiente mínimo	%	0,2	1	1 a 1,5	-
Radio vertical mínimo V ≤ 50 km/h	m	500	1000	350	-
Radio vertical excepcional (∩)	m	500	700	350	700
Radio vertical excepcional (∪)	m	500	350	700	500
ESTACIONES					
Anchura andén lateral	m	2,5	3	4	3
Anchura andén central	m	3,3	4	3	4
Cota andén respecto plano de rodadura	cm	22	28	25	30
Radio mínimo horizontal	m	250	1000	300	300
Pendiente máxima excepcional	%	2,9	4	7	8,5
Máxima pendiente rampa de acceso	%	6	5	5	6
Máximo gap horizontal	mm	80	120	100	-
Máximo gap vertical	mm	50	40	50	-

Fuentes: UITP (2003), Oromí (2007).

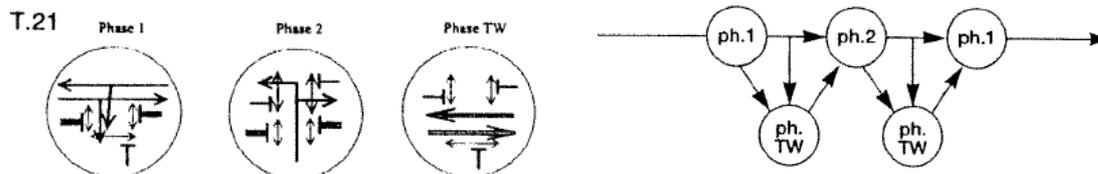
ANEJO 3: GEOMETRÍA Y FUNCIONAMIENTO DE DETERMINADAS INTERSECCIONES

Fuente: CERTU (2000)

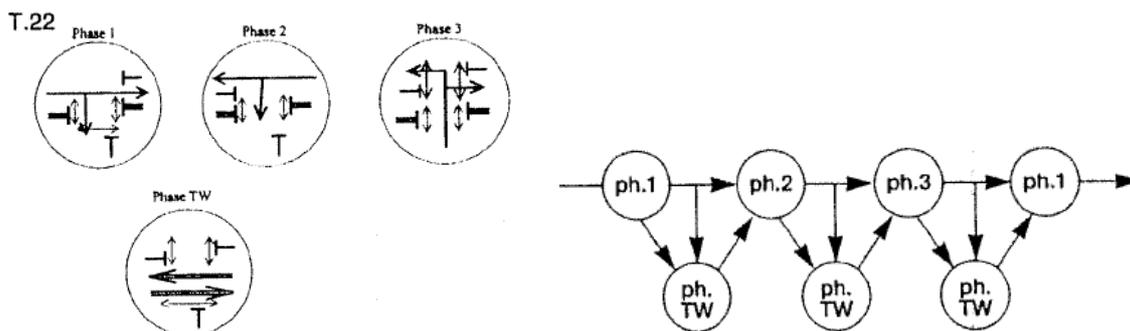
Intersección con tres ramas regulada con semáforos, plataforma lateral en el interior



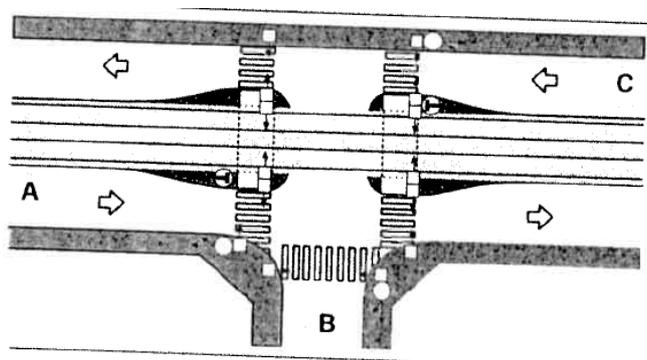
Pocos giros a la izquierda



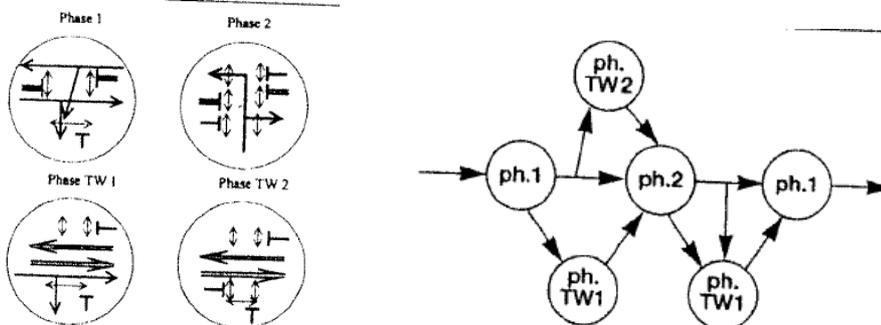
Numerosos giros a la izquierda



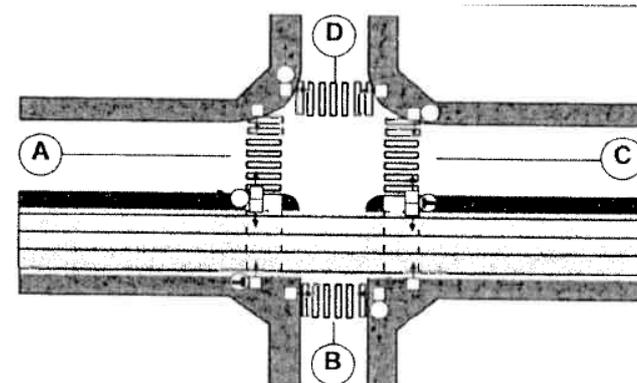
Intersección con tres ramas regulada con semáforos, plataforma central



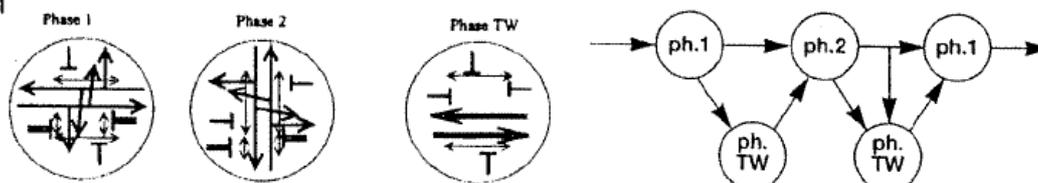
T.31



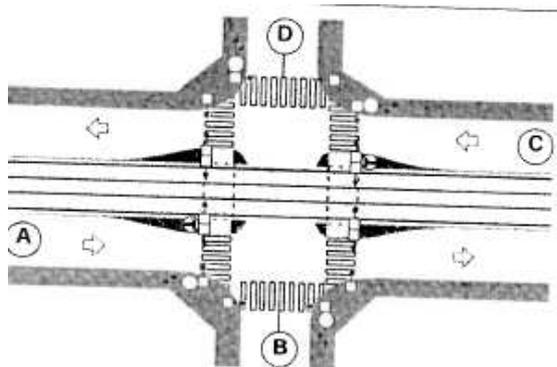
Intersección con cuatro ramas regulada con semáforos, plataforma lateral



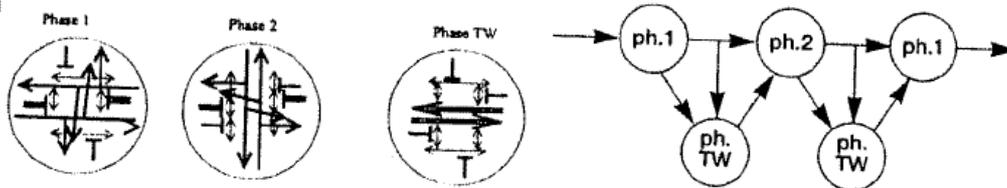
C.11



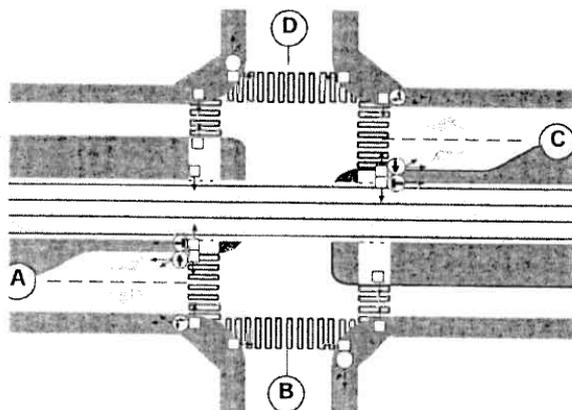
Intersección con cuatro ramas regulada con semáforos, plataforma central



C.21



Con vía especializada



C.22

