

5.

Redes y Rutas de Transporte Público

La correcta planeación de una red de transporte influye en tres aspectos principales del sistema:

- en el desempeño
- en la atracción de usuarios
- en la operación

Esto obliga a cumplir con tres metas principales al diseñar nuestra red, siendo éstas:

- transportar al máximo número de pasajeros
- lograr la máxima eficiencia operativa y con ello buscar los costos mínimos para un determinado nivel de desempeño
- tener presente los impactos que se inducen en los patrones de uso de suelo así como en las metas sociales que la comunidad busca cumplir

5.1 Estructura física de la red

Un sistema de transporte se encuentra integrado por una variedad de líneas y rutas que en su conjunto conforman a la red de transporte de una ciudad. Es por ello que primeramente se tratará la estructura física de las rutas y posteriormente la conjunción de rutas en una red.

5.1.1 Estructura física de las rutas

Se pueden distinguir cinco tipos fundamentales de rutas, mismas que se muestran en la Figura 5.1 y se presentan a continuación:

Radiales. Es el tipo mas común y un gran número de ciudades se han desarrollado en función de este tipo de rutas. Predominan en ciudades pequeñas y medias al estar la mayor parte de sus viajes canalizados a un centro de actividades o centro histórico. En ciudades mayores a los 300,000 habitantes este tipo de rutas empieza a ser ineficiente ya que concentra los movimientos y no considera las necesidades que se presentan entre otras áreas urbanas. Esto induce a que la distribución del servicio se encuentre limitada a ciertas áreas de la ciudad y concentre las terminales en las zonas de mayor densidad.

Diametrales. Por lo general, al desarrollarse la red de transporte y crecer la ciudad, un primer ajuste que se realiza es la conexión de dos rutas radiales,

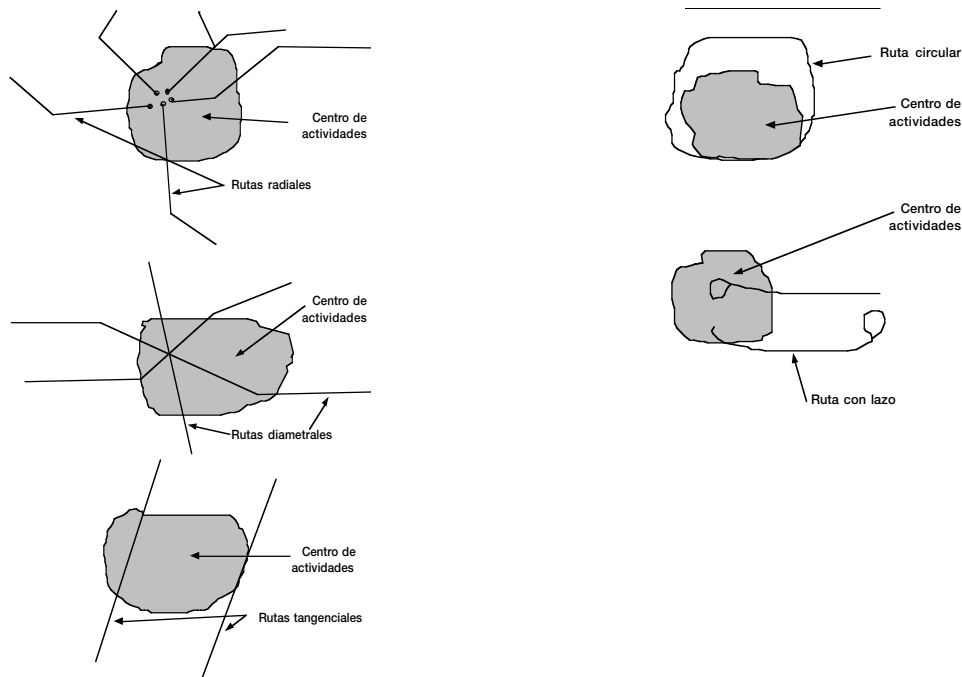


Figura 5.1.
Tipología de rutas.

mismas que conforman una nueva ruta que pasa por el centro y conecta dos extremos de la ciudad.

Con esta conexión se logra una mejor distribución del servicio y evita la concentración de terminales en los centros históricos o de actividades, lográndose una mayor eficiencia. Sin embargo, se debe tener presente la necesidad de que exista un balance en la demanda a ambos extremos de la ruta ya que en caso contrario la operación y la asignación de oferta se dificulta con los consecuentes desbalances en la relación oferta-demanda. Asimismo, la longitud de la ruta puede ocasionar demoras y cargas desbalanceadas.

Tangencial. Son rutas que pasan a un lado del centro de actividades o centro histórico de una ciudad. Este tipo de rutas solo es recomendable en las grandes ciudades debido a la menor demanda que ellas presentan. Un ejemplo claro lo representa la línea 4 del metro de la Ciudad de México o la Línea 1 del tren ligero de Guadalajara.

Rutas con lazo en su extremo. Son rutas de configuración radial en las que se presenta un lazo en uno de sus extremos lo que induce a contar con una sola terminal. Es necesario buscar una coordinación para lograr un mismo intervalo en la porción que conforma el lazo.

Circulares. Por lo general, sirven de rutas conectoras con las radiales, permitiendo una mejor distribución de los usuarios así como una mejor utilización del parque vehicular. En este caso, se eliminan las terminales, pero presentan el problema operativo de no poder recuperar tiempos perdidos. Casos típicos de este tipo de rutas o líneas son las líneas circulares de los metros de Londres y Moscú o los circuitos de los autobuses de Guadalajara y otras ciudades mexicanas. A su vez, pueden presentarse rutas en forma de arco o segmentos de círculo que no pasan por el centro de la ciudad.

La Figura 5.2 muestra el comportamiento de la demanda para las rutas radiales, diametrales y circulares. En la primera se observa que la ruta absorbe un buen número de sus pasajeros en su extremo a la vez que este descende conforme se acerca al centro de actividades. Por el contrario, la ruta circular mantiene una carga uniforme a lo largo de todo su recorrido. Finalmente, la ruta diametral atrae usuarios conforme parte de su extremo, llegando a su sección de máxima demanda antes de arribar al centro histórico, donde descarga una

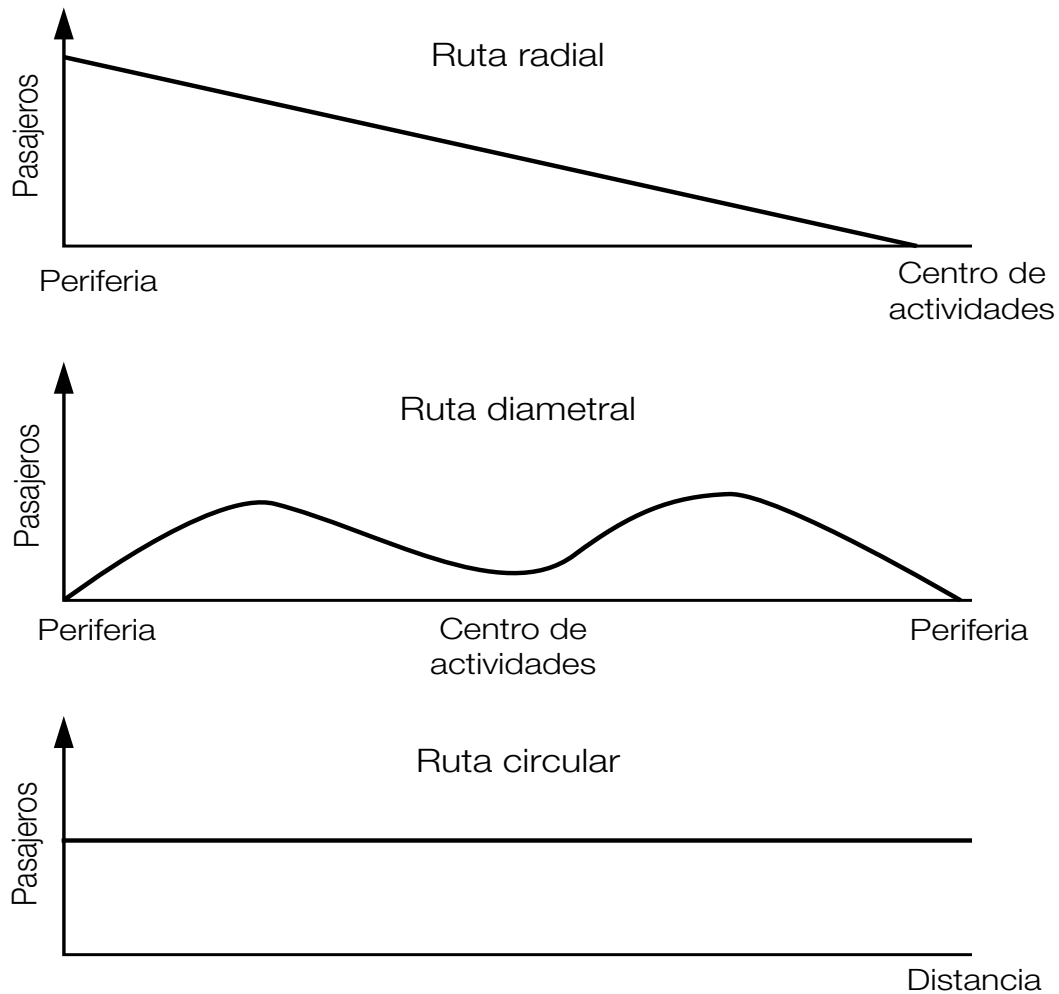


Figura 5.2.
Polígonos de carga esquemáticos para cada tipo de ruta.

porción de sus usuarios y recarga posteriormente para distribuirlos a lo largo del resto de la ruta.

Las rutas o líneas de transporte público normalmente convergen en una sola línea o ruta troncal y en especial conforme se acercan al centro histórico. Esto orilla que se establezcan dos tipos de rutas, conocidas como ramales y como alimentadores. Las primeras, se integran al tramo troncal sin necesidad de realizar transbordos, mientras que las rutas alimentadoras, permiten cubrir el área y transportar al usuario a un punto de transbordo donde el usua-

rio hace uso de un medio de transporte de igual o mayor capacidad. La Figura 5.3 esquematiza esta diferencia entre ramales y troncales. Es normal que se considere el uso de ramales en corredores que presentan volúmenes altos y se considera generalmente el uso de un solo medio de transporte. Por otra parte, es deseable el uso de rutas alimentadoras en corredores donde los volúmenes de pasajeros son bajos, conectándose con una ruta troncal. En este caso es factible el uso de dos o mas medios de transporte: uno para el tramo alimentador y otro para la troncal.

La operación de ramales y troncales puede ser de varios tipos, entre los que se encuentran los mostrados en la Figura 5.4. Sus diferencias radican principalmente en la regularidad del servicio, el factor de carga α y, consecuentemente en los niveles de servicio en los tramos troncales y en los ramales [1,2]. El *primer caso*, presenta dos ramales con igual número de pasajeros, de capacidad y de frecuencias, lo que permite contar con frecuencias uniformes en ambos extremos. En el *segundo caso*, en el tramo troncal operan dos ramales con volúmenes diferentes y capacidades diferentes, pero con frecuencias iguales, lo que permite que se mantenga una regularidad en el servicio pero con cargas diferentes.

En el *tercer caso*, se manejan volúmenes diferentes de pasajeros así como frecuencias pero se mantiene la misma capacidad vehicular lo que induce a diferencias en la regularidad del servicio y variaciones en los factores de car-

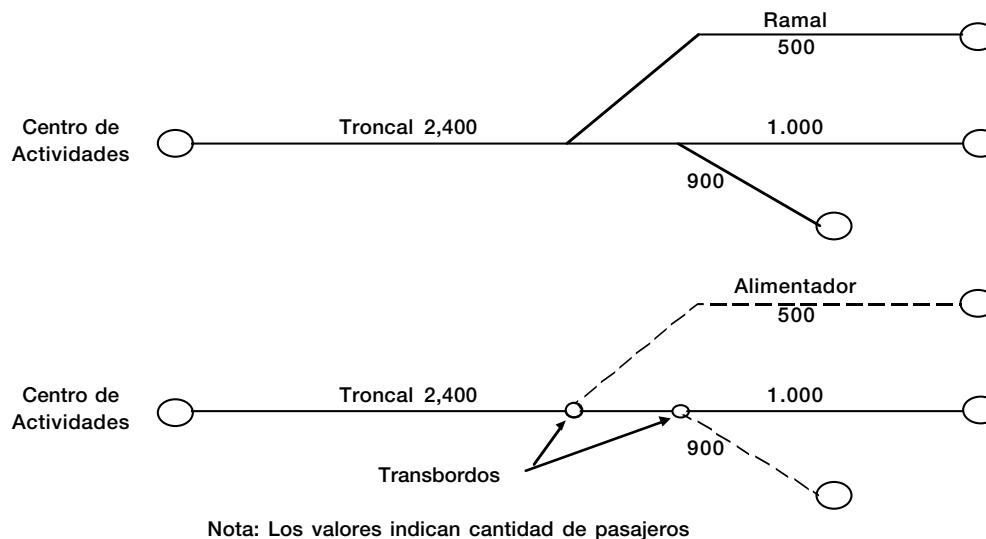
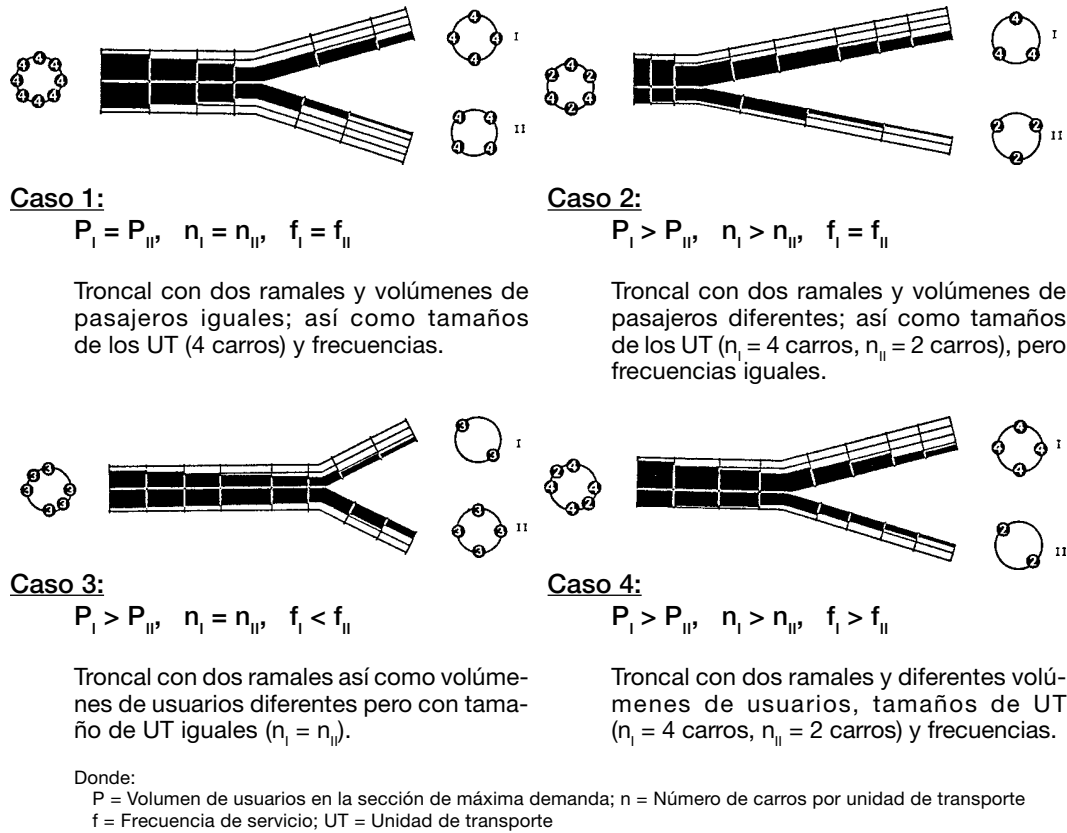


Figura 5.3.
Diferencia entre ramal y alimentador.



Fuente: Referencia [1, 2].

Figura 5.4.
 Tipo de operación de ramal y troncal.

ga en el tramo troncal. Finalmente, el *cuarto caso* muestra variaciones en la frecuencia, capacidad y volumen de pasajeros, lo que induce a irregularidades en los tramos troncales, así como variaciones en los factores de carga en el tramo troncal y un reparto desbalanceado en los volúmenes.

En el caso de volúmenes diferentes de usuarios, es deseable contar con un factor de carga bajo ya que la capacidad ofrecida observará estas diferencias. Por otra parte, en el caso de volúmenes similares de usuarios (condiciones estables sin fluctuaciones) es deseable operar con un factor alto con el fin de utilizar el equipo.

Por su parte, las rutas alimentadoras presentan las siguientes características en comparación con los ramales:

- + Se pueden utilizar diferentes medios de transporte
- + Se pueden lograr factores de carga mas uniformes
- + Las irregularidades que se presenten en las alimentadoras no afectan a la ruta troncal
- Requiere de transbordos

Finalmente, las rutas con ramales difieren de las rutas alimentadoras en los siguientes aspectos:

- *Sin transbordos.* Se presentan conexiones directas entre estaciones en los ramales y la troncal.
- *Un medio de transporte.* Se utiliza el mismo tipo de unidad para todo el sistema. Solamente varía el tamaño de la unidad de transporte conforme a las rutinas y políticas operacionales.
- *Confiabilidad depende de los ramales.* Las diferencias en los derechos de vía entre troncales y ramales reduce la confiabilidad. Con el mismo derecho de vía se logra una mejor adherencia a los itinerarios en el caso de los ramales que en el caso de alimentadores.
- *Menor utilización de la capacidad.* La capacidad de la unidad de transporte en los ramales debe acomodar los volúmenes de usuarios a lo largo de todo el recorrido y en especial dentro de la troncal, donde se hace un uso razonable de la capacidad de la unidad de transporte. Los alimentadores hacen un mejor uso de la capacidad debido a la operación segmentada.
- *Fuerte identidad del sistema.* Una red con ramales presenta una mayor identidad de sistema que una troncal con alimentadores.
- *Cambios en la demanda.* En función del medio de transporte, una troncal con ramales puede fácilmente absorber los cambios y fluctuaciones en la demanda, situación que se dificulta con alimentadores.
- *Menor tiempo de terminal.* El tiempo terminal total será menor con ramales que con alimentadores. Se mejora la utilización del parque vehicular.
- *Tiempo de viaje.* Normalmente es menor con ramales.

5.1.2 Estructura física de la red

La forma o estructura física de una red de transporte público puede ser clasificada en varios tipos generales, mismas que dependen de la red vial con que

cuenta la ciudad, de su forma urbana (patrones de uso del suelo, densidades, entre otros aspectos), la topografía del lugar y una serie de factores adicionales. Una diferencia fundamental se presenta entre las redes con medios de transporte que operan en derechos de vía tipo C (tránsito mixto) y aquellas redes que operan exclusivamente en derechos de vía tipo A o confinados. El Cuadro 5.1 muestra las diferencias principales.

REDES CON MEDIOS DE TRANSPORTE EN DERECHOS DE VIA TIPO C	REDES CON MEDIOS DE TRANSPORTE EN DERECHOS DE VIA TIPO A
Sigue el trazo vial	Alineamiento independiente
La distribución y recolección de usuarios es un elemento primordial	Operación de líneas para cubrir mayores distancias
Paradas mas cercanas, lo que propicia velocidades menores	Paradas mas lejanas, lo que propicia velocidades mayores
Trabaja bajo control manual	Trabaja bajo control por señal
Mayor frecuencia	Menor frecuencia
Redes mas densas	Redes menos densas
Menor imagen	Mayor imagen

Cuadro 5.1.
Diferencias entre redes.

Aún cuando cada tipo de red tiene características específicas, ciertas formas de redes presentan características de servicio y operacionales que las distinguen, las cuales se describen a continuación:

- **Red ortogonal.** Este tipo de red se encuentra en muchas ciudades con vialidades conformando una retícula uniforme que induce a que las rutas sean trazadas siguiendo estos patrones. Este tipo de red ofrece una gran cantidad de transbordos en sus puntos de intersección y por ello se tiene una cuenca de servicio extensa y uniforme y ofrece una buena conectividad. A su vez, no presenta un problema de convergencia excesiva y de concentración de rutas, situación característica de una red radial. Esta red permite al usuario orientarse fácilmente pero no siempre sigue las líneas de deseo principales, haciendo que un buen porcentaje de los viajes requieran de un transbordo.

Este tipo de red opera adecuadamente en áreas con densidades de población uniforme y que cuentan con una retícula vial, ocasionando que se requiera una calidad mas o menos uniforme en el servicio de transporte. Como ejemplos de este tipo de red encontramos las redes de autobuses de la Ciudad de México, de Nueva York y Filadelfia. La Figura 5.5 muestra la red ortogonal de la Ciudad de Oakland.

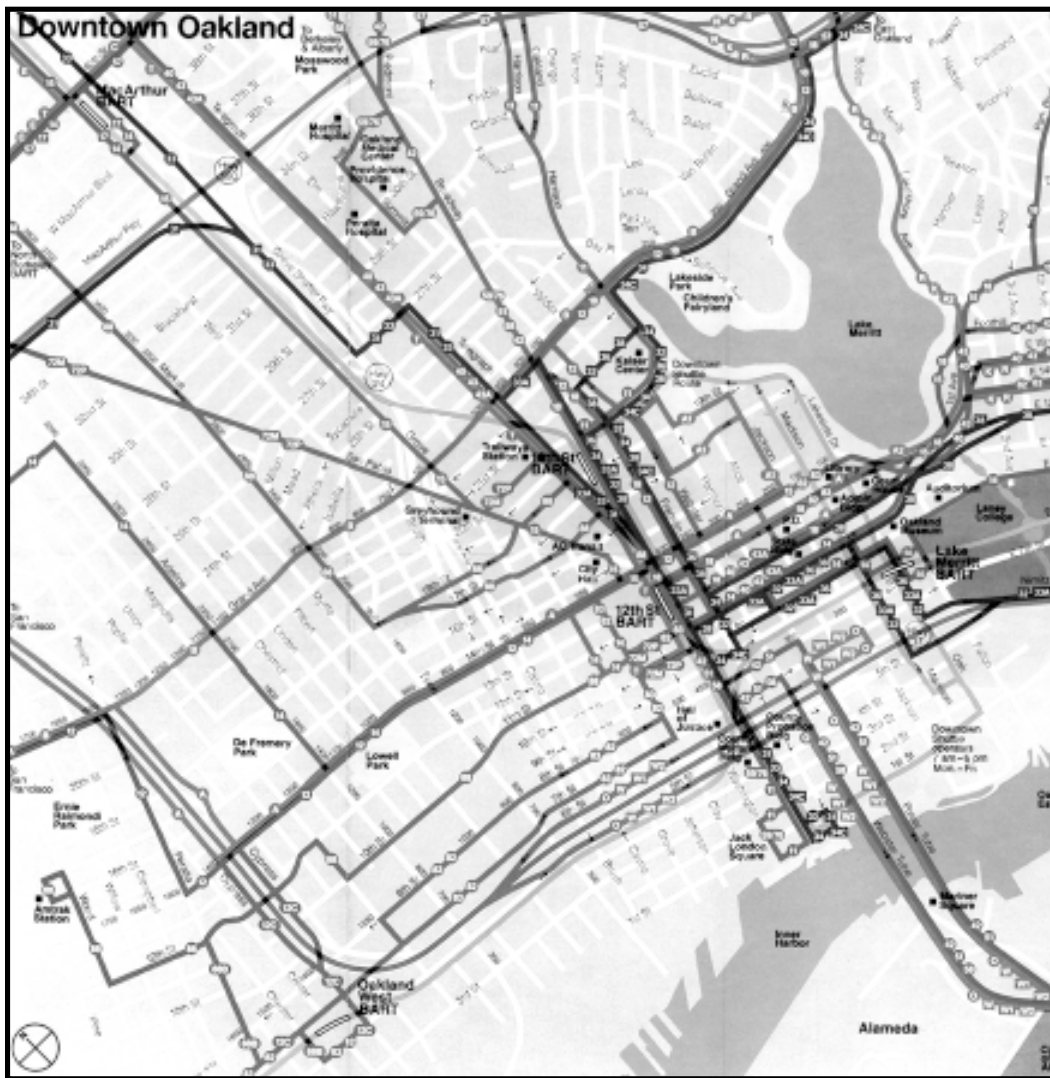


Figura 5.5.
Red ortogonal (Oakland, Estados Unidos). Mapa cortesía de AC Transit.

- **Red radial.** Esta red está integrada predominantemente por rutas radiales o diametrales que se enfocan al centro histórico de una ciudad o en un centro de actividad suburbano. Por ello, tiende a seguir las líneas de deseo mas cargadas en forma de radiaciones desde punto focal hacia varias direcciones y ramificándose con una menor intensidad de servicio hacia la periferia y áreas de baja densidad. La duplicación de rutas en el centro de la ciudad permite ofrecer una capacidad adecuada para atender la concentración de viajes en estos tramos de la red.

En la planeación y preparación de itinerarios en los ramales, se debe analizar la regularidad del servicio en los tramos comunes para evitar la formación de convoyes en los que el primer vehículo viene demorado y sobrecargado mientras que el segundo va con una carga baja, situación que puede tornarse grave especialmente a la hora de máxima demanda. Asimismo, es un aspecto negativo el empalme de estaciones y paradas que fomentan la concentración de usuarios en una misma área urbana.

La red radial presenta una menor conectividad que la red ortogonal y se acostumbra contar con rutas circunferenciales para permitir viajes puerta a puerta mas directos para los viajes que propiamente no son radiales. Puesto que la cobertura de área y la intensidad del servicio de una red radial no son uniformes ya que decrecen del centro hacia la periferia, esta red opera mejor en ciudades con una alta concentración de viajes y que presentan una configuración vial radial. La mayoría de las redes regionales y suburbanas de transporte muestran esta configuración, entre las que se pueden citar la red de suburbanos del Area Metropolitana de la Ciudad de México, o las redes de autobuses de las ciudades de Juárez e Irapuato, entre otras. La Figura 5.6 muestra la red radial que se presenta a varias terminales del metro de la Ciudad de México.

- **Red irregular.** Dentro de este tipo de redes se incluyen todas aquellas que no siguen ningún esquema geométrico, encontrándose principalmente en muchas ciudades con trazos viales irregulares, con barreras topográficas y artificiales y otros condicionantes locales que influyen en el trazo mismo de la red. Naturalmente, no se puede hacer ninguna caracterización general sobre sus cuencas de transporte, la conectividad, la sinuosidad y otros aspectos puesto que no responden a casos específicos.

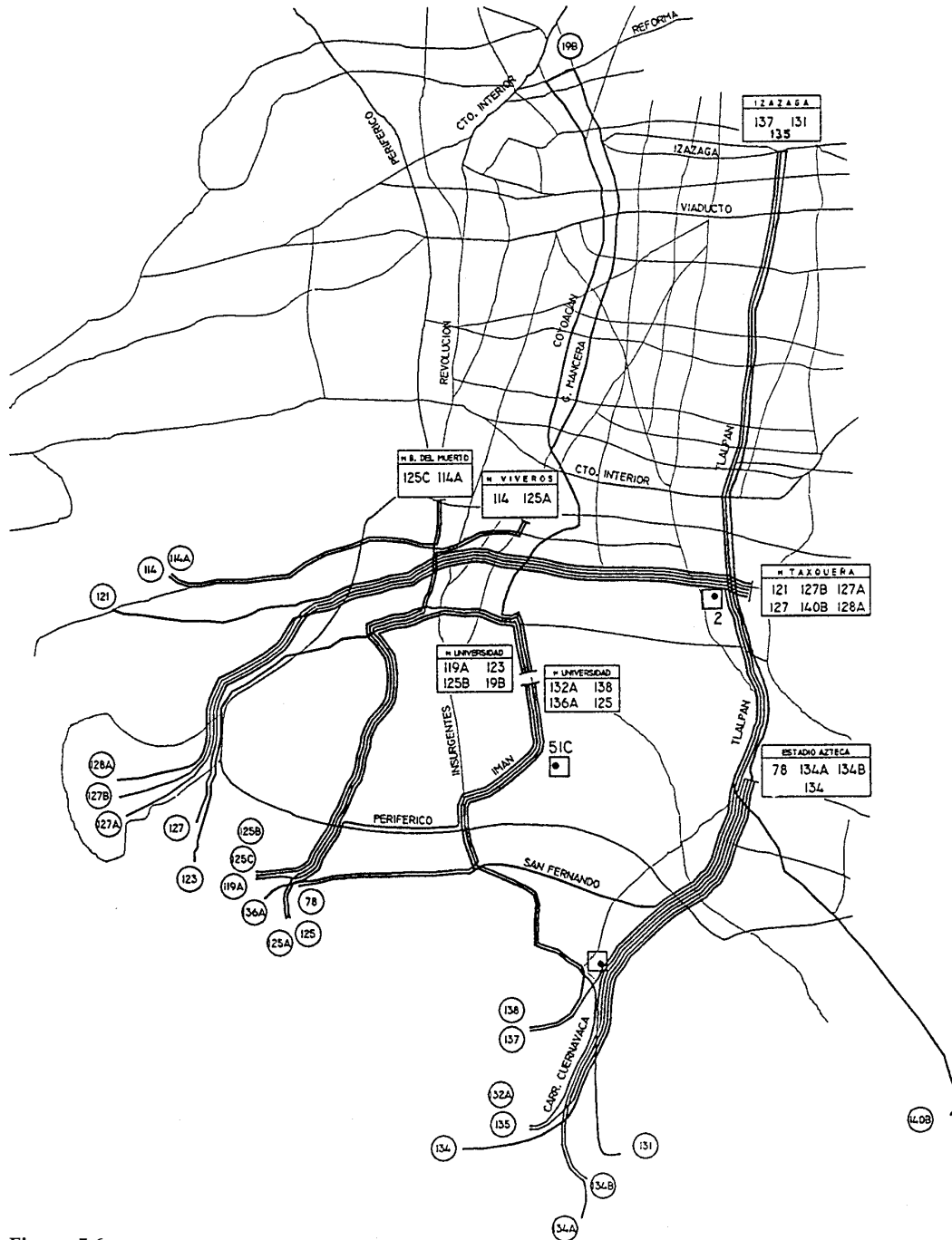


Figura 5.6.
Red radial a estaciones de metro (Ciudad de México, México).

Este tipo de red es frecuente en ciudades en donde su desarrollo urbano ha seguido trazos viales irregulares. Sin embargo, en muchas ciudades de México, donde la traza urbana era prácticamente ortogonal o seguía patrones radiales, ha pasado a fomentarse el uso de redes irregulares, las cuales se prestan muy poco para proporcionar un servicio de transporte público adecuado. La Figura 5.7 muestra la red irregular del centro de París.

- **Red flexible.** Este tipo de red se presenta en los servicios de respuesta a demanda y otros tipos de transporte en donde el derrotero está determinado por la demanda de usuarios o de grupos de individuos. Este tipo de red se puede clasificar en tres tipos distintos:
 - *Muchos a uno* (o uno a muchos), el cual se utiliza principalmente en alimentadoras a rutas radiales principales y consiste en servir

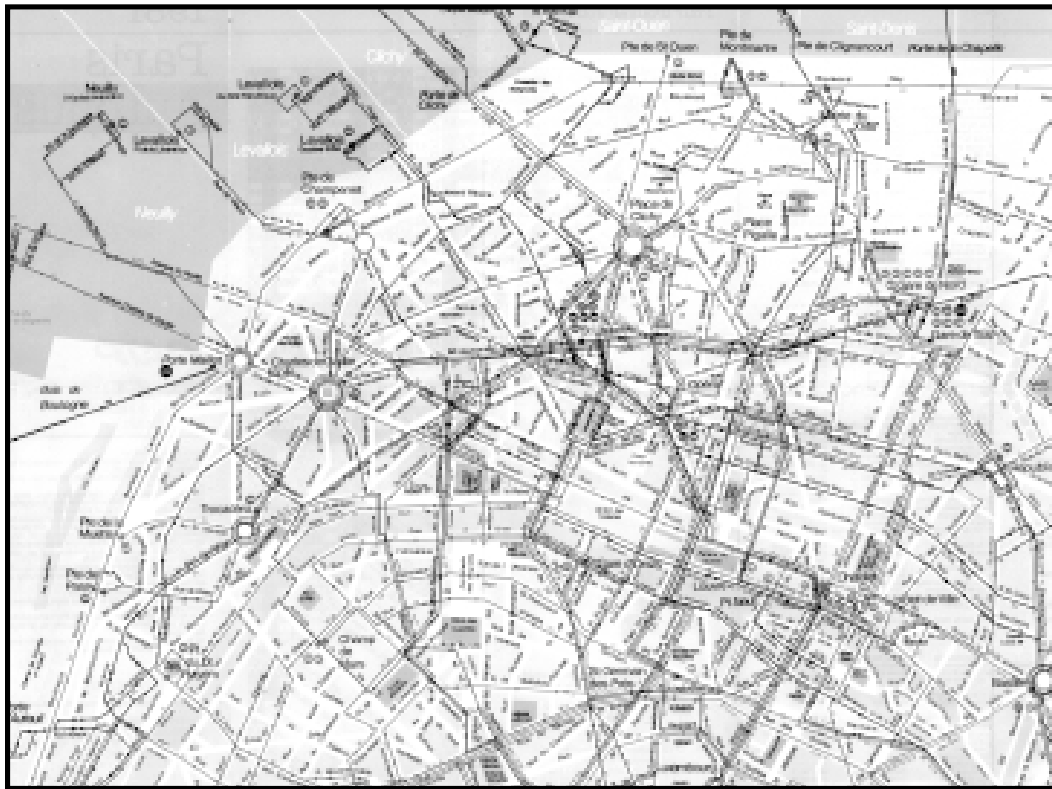


Figura 5.7.
Red irregular (París, Francia). Mapa cortesía de RATP.

muchos destinos con un punto atractor final. La Figura 5.8a muestra este tipo de red.

- *Muchos a pocos*, el cual se utiliza en áreas con varios puntos focales (estaciones, centros comerciales) y que están rodeados por áreas de baja densidad. Este tipo de red implica atender muchos destinos con unos cuantos puntos atractores, situación que se muestra en la Figura 5.8b.
- *Muchos a muchos*, esquema que se utiliza para atender zonas de baja densidad sin puntos focales, implicando con ello el atender muchos destinos con muchos puntos atractores. La Figura 5.8c ilustra este tipo de red.

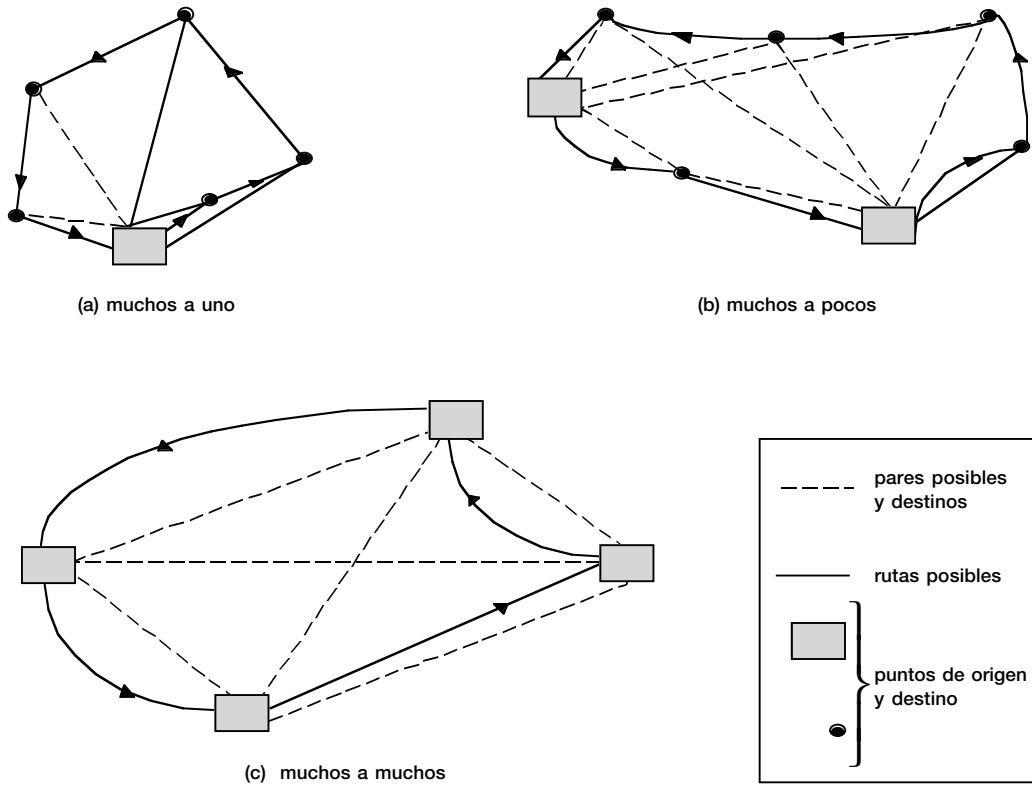


Figura 5.8.
Red flexible.

- **Red con Transferencias Coordinadas.** Este tipo de red tiene, por definición, puntos focales y tramos fijos de rutas entre estos puntos, como se muestra en la Figura 5.9. Las distancias entre puntos focales son mas o menos uniformes, excepto si se presentan variaciones en las velocidades de operación. En este caso las longitudes de los tramos tienden a incrementarse con la reducción en las velocidades. Su propósito principal es considerar no solamente el trazo físico de la red sino buscar un esquema operativo que facilite los transbordos y permita una adecuada conectividad entre las diferentes rutas que componen la red. Un ejemplo de esta red es la que se presenta en Canberra, Australia.

5.2 Características y elementos de una red de transporte

El diseño eficiente de una red de transporte público y de las rutas individuales que la componen es un aspecto que influye significativamente en el desempeño, la atracción, los resultados económicos y la operación misma del sistema. Para su diseño se deberán considerar los siguientes elementos:

- buscar un diseño sencillo en el trazo de la red
- si los corredores presentan cargas equitativas y una red densa, entonces es recomendable el establecimiento de troncales
- tener presente que el cuello de botella de una línea es su terminal por lo que éstas deben ser diseñadas para operar rápida y eficientemente
- conforme el número de troncales aumenta, la operación debe ser mas rigurosa

El desempeño y la eficiencia de una red de transporte y del servicio [3,4] que prestan puede ser medido por varias características que afectan a uno o varios de los grupos que participan en el transporte: el usuario, el prestatario y la comunidad. El Cuadro 5.2 muestra las principales características que presenta cada configuración de red. Las características y los grupos a los que afecta una red de manera mas contundente son:

- Cobertura de área o cuenca de transporte (usuario y comunidad)
- Sinuosidad (usuario)
- Conectividad (usuario)
- Densidad del servicio (usuario, comunidad)

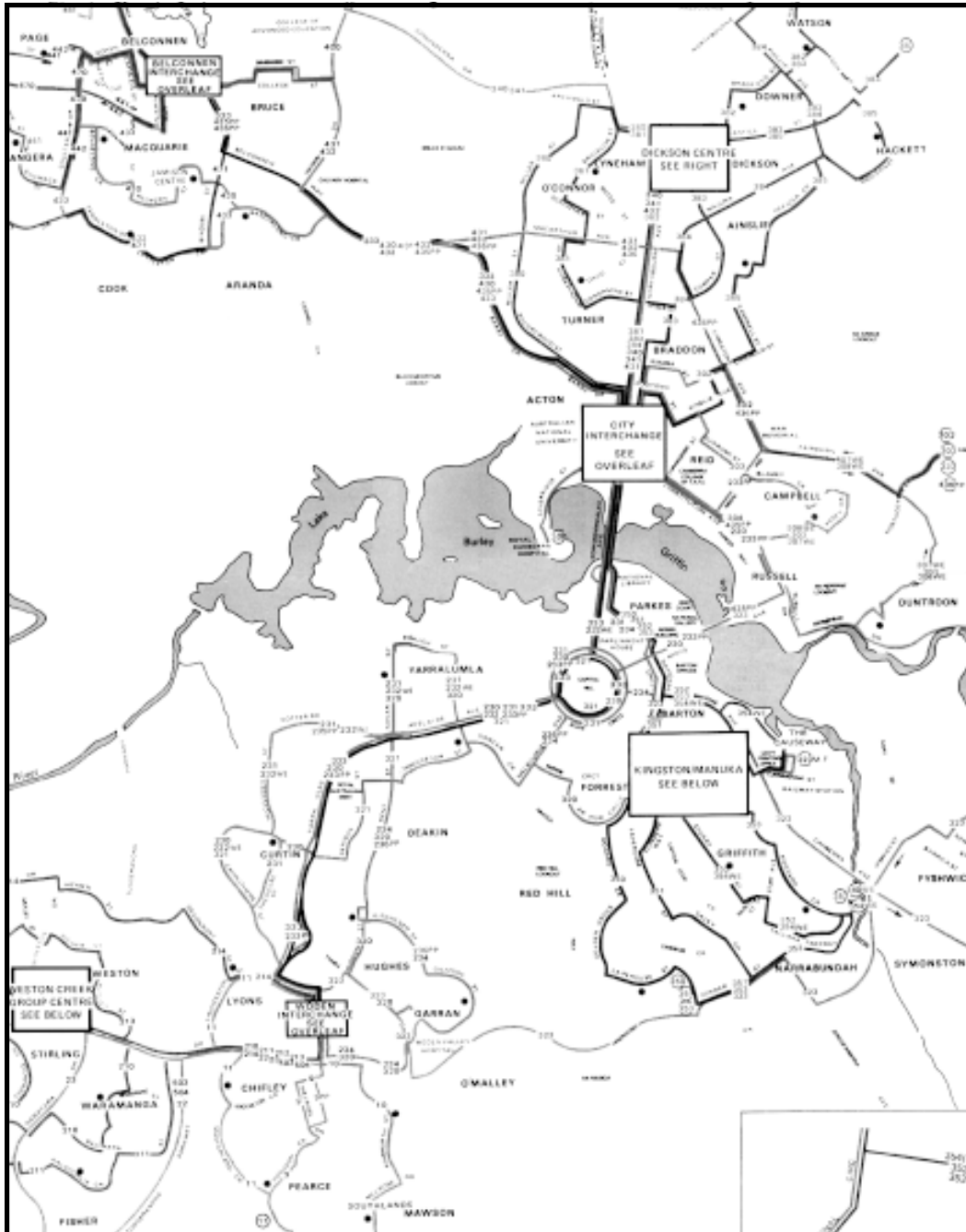


Figura 5.9.
Red con transferencias coordinadas (Canberra, Australia). Mapa cortesía de ACTION.

TIPO DE RED CARACTERÍSTICAS	ORTOGONAL	RADIAL-CIRCUNFERENCIAL	IRREGULAR	FLEXIBLE	TRANSFERENCIAS COORDINADAS
Cobertura del área	muy bien	Buena en el área central; decrece hacia periferia	Variable	Inestable	Variable
Sinuosidad	Mala	Buena para las radiales; decrece para las demás	Variable	Normalmente buena	Variable
Transbordos Conveniencia y demoras	Uno, para la mayoría de los viajes	Para la mayoría de los viajes ningún transbordo	Muy pobre	Mala	Excelente
Calidad del servicio	Uniforme	Excelente para las radiales; mas bajo para otras	No uniforme	Personalizada	Muy buena
Imagen y claridad de la red	Excelente	Muy Buena	Mala	Muy mala	Muy buena

Cuadro 5.2.

Características de cada tipo de red.

- Transbordos (usuario)
- Velocidad (usuario, prestatario y comunidad)
- Infraestructura (prestatario)
- Costos de operación (prestatario y comunidad)

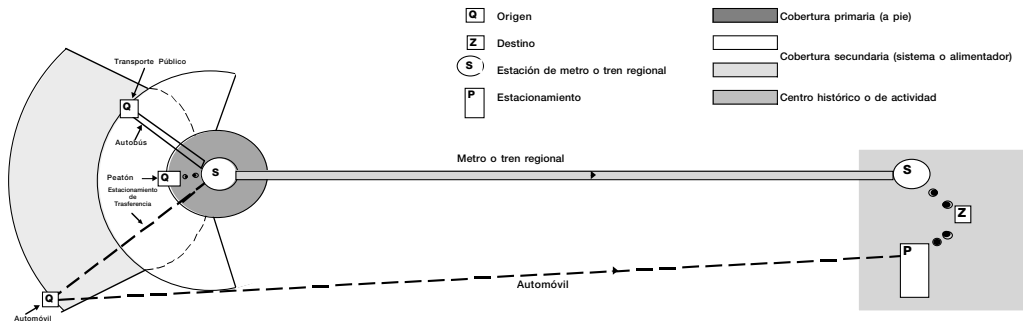
Cada una de estas características serán tratadas a continuación:

5.2.1 Cobertura del área de servicio o cuenca de transporte

Este requerimiento muestra la extensión de una red dentro del área o cuenca en la que se presta el servicio así como el desempeño individual de cada ruta. Se define como el área servida por el sistema de transporte público siendo su unidad de medida el tiempo o la distancia recorrida a pie y que resulta aceptable caminar. Este valor puede ser relacionado con un porcentaje de la población a la que sirve. Así por ejemplo, se establece una cobertura de una ruta con un radio de 400m y que cubre al 90% de las oportunidades de trabajo [3]. Normalmente, la cobertura en los centros históricos de las poblaciones de México es del 100% y ésta va disminuyendo drásticamente conforme se tiende a áreas de una menor densidad o atracción. Por ello, al examinar la cobertura se debe considerar la extensión de la red, la provisión de medios de acceso a la red y la cobertura que se logra en el centro de actividades de una ciudad.

Generalmente se considera como cuenca primaria la distancia que puede ser recorrida a pie en cinco minutos ($\pm 400\text{m}$) desde cualquier estación o parada. La cuenca secundaria define a todos aquéllos puntos que se encuentran entre cinco y diez minutos y representa una menor captación de usuarios potenciales [5, 6, 7]. La Figura 5.10 muestra este concepto para una estación de metro o tren regional.

Para el caso de rutas de transporte público que no cuentan con paradas previamente establecidas se utiliza el concepto de una banda de cobertura o cuenca continua bajo las mismas consideraciones anteriores. La Figura 5.11 muestra un ejemplo hipotético de la cobertura, tanto en ejes de transporte



Fuente: Referencia [5].

Figura 5.10.
Cobertura primaria y secundaria.

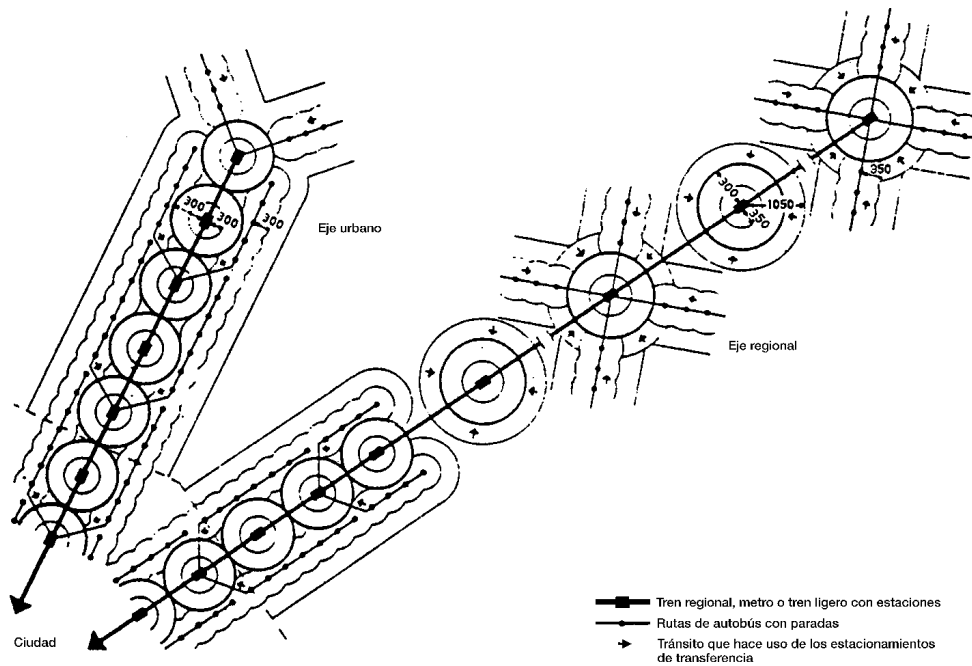


Figura 5.11.
Cobertura urbana y regional.

urbano como regionales. A su vez, en el caso de paradas previamente establecidas es más frecuente el uso de radios de cobertura, tal y como se muestra en la Figura 5.11 anterior. Esta cobertura de área se puede expresar como un porcentaje del área urbana que está dentro del área de servicio:

$$\text{Cobertura} = \frac{\text{área cubierta por el servicio}}{\text{área urbana}}$$

Algunos estudios en estaciones del metro han establecido que en un radio de 200m prácticamente todos los viajes que llegan a ella se hacen a pie; a partir de los 600m ya aparecen algunos viajes en autobuses (10%), empezando a declinar rápidamente los viajes a pie. El uso del autobús como medio de acceso se incrementa rápidamente después de los 800m y aparece el uso de los estacionamientos de transferencia así como el uso de rondas y aventones a las estaciones del metro. Por ello, es importante definir la cuenca de servicio en base al medio de transporte que se esté considerando, siendo más amplia para el caso de transporte férreo que para el caso de los autobuses. La Figura 5.12 muestra esta situación.

Se puede esperar que la mayoría de los usuarios potenciales que se encuentran a una distancia de cinco minutos de una parada hagan uso del servicio de transporte, si es que éste es de una calidad satisfactoria. Mas allá del radio de cinco minutos, el porcentaje de usuarios que utilizan el transporte público decae rápidamente, como se muestra en la Figura 5.13, debido a las molestias que causa el caminar una mayor distancia. Asimismo, esta distancia se ve incrementada dependiendo del medio de transporte que vaya a abordar. Naturalmente, las curvas mostradas en la figura anterior son hipotéticas y dependerán en gran medida del tipo y calidad del servicio ofrecido así como otros factores locales como pueden ser el clima, las pendientes o el entorno urbano.

En el caso de las pendientes, ésta implica una reducción en la distancia que el usuario está dispuesto a caminar. Se puede considerar que por cada 10m de diferencia en el nivel del suelo, el usuario tiende a considerar una reducción en la cuenca de servicio de 100m [8, 9, 10]. La Figura 5.14 ilustra la relación entre la diferencia de nivel y el gradiente aceptable. Es deseable considerar diferentes factores de corrección relacionados con la distancia recorrida a pie y las pendientes. Así se tiene que:

$$d = k \times d_h$$

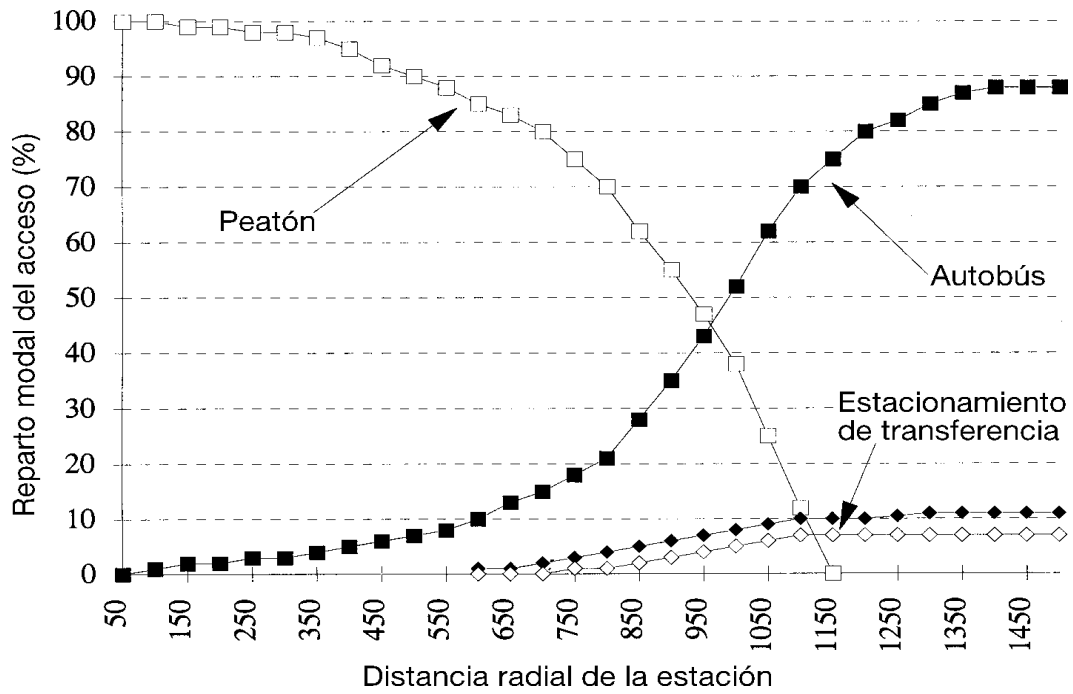


Figura 5.12.
Acceso de una estación de metro relativa a la distancia de la estación.

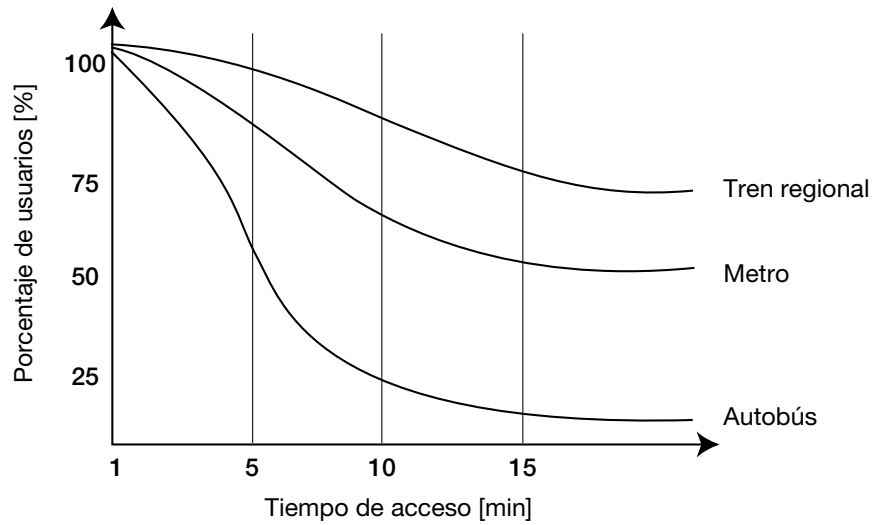
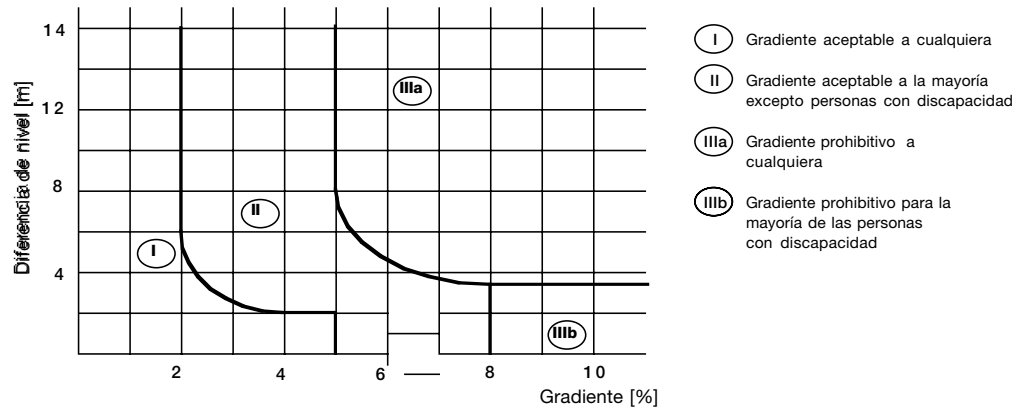


Figura 5.13.
Usuarios potenciales en función del tiempo de acceso.



Fuente: AP Young y RW Cresswell. *The Urban Transport Future*. Londres: Construction Press, 1982.

Figura 5.14.

Relación entre la diferencia de nivel y gradiente aceptable.

donde:

d = distancia recorrida ponderada

k = factor de corrección debido al gradiente

d_h = distancia con pendiente nula

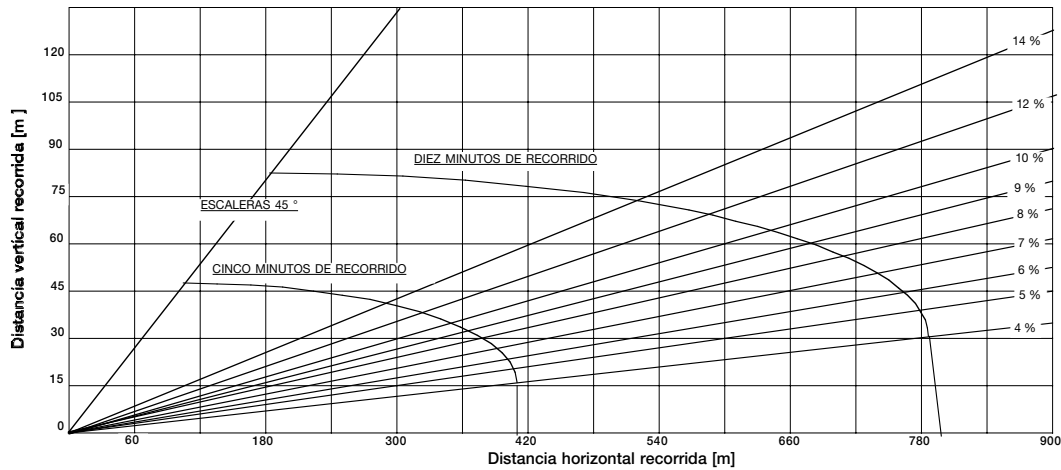
Los valores recomendados para k son:

$k = 1.0$ cuando el gradiente es 0% $k = 1.5$ cuando el gradiente es 5%

$k = 2.5$ cuando el gradiente es 10% $k = 3.0$ cuando el gradiente es 15%

A su vez, la Figura 5.15 relaciona las distancias en vertical y en horizontal que un peatón recorre en función de diferentes pendientes, mostrando, además, dos curvas correspondientes a 5 y 10 minutos de recorrido (a una velocidad de 4.8 km/h). Con esta gráfica es factible determinar las distancias en vertical y en horizontal recorridas por un peatón en función del tiempo de recorrido y de la pendiente.

Para determinar que tan lejos se debe extender el servicio de transporte público, es necesario considerar que éste debe servir a la totalidad del área urbana. Sin embargo, en muchos casos esta situación no es rentable para empresas privadas motivo por el cual el municipio o estado deben proveer servicios de naturaleza social, ya sea por su inaccesibilidad, o por su baja densidad.



Fuente: Referencia [8].

Figura 5.15.

Distancia recorrida en función de la pendiente.

Finalmente, otra manera de medir la amplitud del servicio de transporte público es a través de la definición del porcentaje de población que vive dentro de las cuencas primaria y secundaria, para lo cual el uso de los archivos estadísticos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) facilitan esta labor. En los casos donde existen dos redes que ofrecen diferentes niveles de servicio (tales como el servicio local y el servicio express o autobús y metro) su cuenca puede ser considerada separadamente puesto que cada red atrae a diferentes usuarios o a diferentes viajes del mismo tipo de usuarios.

5.2.2 Líneas de deseo

En el diseño de una red o ruta de transporte es necesario conocer los puntos de origen y destino o líneas de deseo que el usuario cautivo y potencial desea seguir con el fin de que las rutas de transporte se adecúen de la mejor manera a este requerimiento y reduzcan los tiempos de recorrido a bordo del usuario. En este ejercicio se deberá considerar el balanceo de la demanda a ambos extremos de la ruta con el fin de minimizar la capacidad requerida y por ende el número de unidades de transporte.

Así por ejemplo, la Figura 5.16a muestra esquemáticamente las líneas de deseo resultantes de la interpretación de las matrices de origen y destino que

se presentan entre cinco puntos atractores/generadores de viajes, mientras que la Figura 5.16b presenta los trayectos resultantes de revisar y ajustar estas líneas de deseo.

A su vez, resulta conveniente elaborar un mapa de cargas (volúmenes) como el mostrado en la Figura 5.17 ya que permite visualizar de una manera rápida los puntos de mayor carga (o frecuencia) sobre la red y detectar áreas geográficas de mejoras futuras.

5.2.3 Sinuosidad de una ruta

Es la relación entre la distancia recorrida por el vehículo entre dos puntos y la distancia aérea (en línea recta) entre estos mismos puntos. El caso deseable es que esta relación tienda a uno pero el trazo de las rutas se ve influenciado por la vialidad, por la topografía y por obstáculos naturales y artificiales que evitan, en la mayoría de los casos, que esta relación sea igual a 1.

Una red ideal contempla rutas de transporte que conectan los grandes generadores de viajes a través de rutas directas, estableciendo las mismas a lo largo de las principales líneas de deseo o corredores con mayor concentración de viajes, sirviendo lo mas posible a las áreas habitacionales. Aun cuando esta situación es una meta deseable, generalmente existe un conflicto con la cobertura del servicio, la cual debe ser la mayor posible. Lógicamente, se puede lograr una mayor cobertura si se incrementan los recorridos tortuosos, situa-

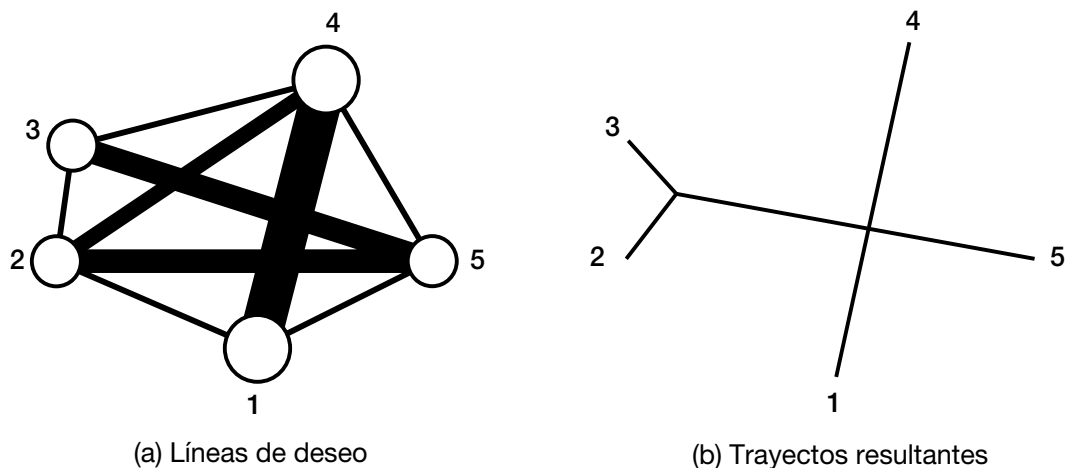


Figura 5.16.
Líneas de deseo.

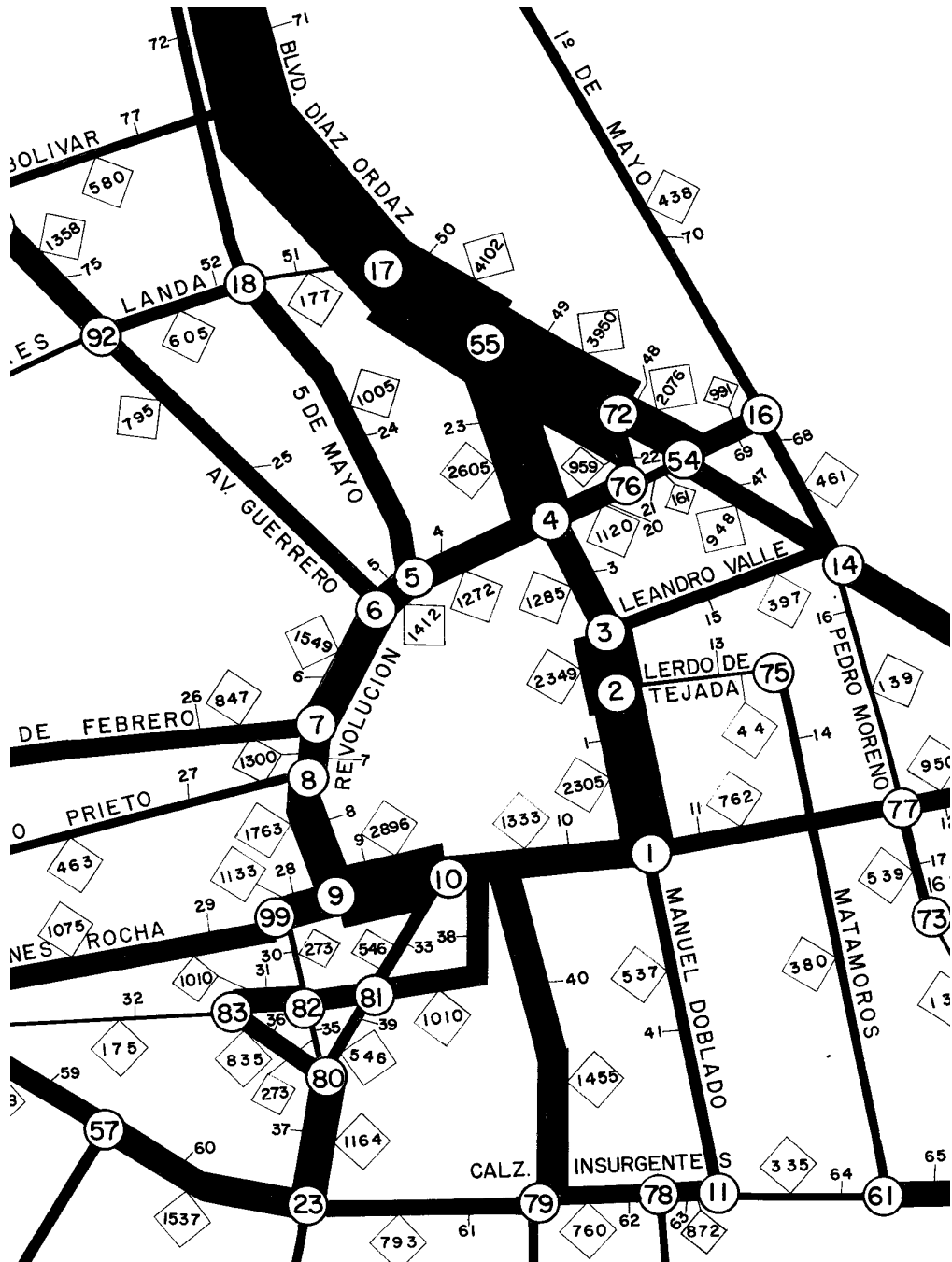
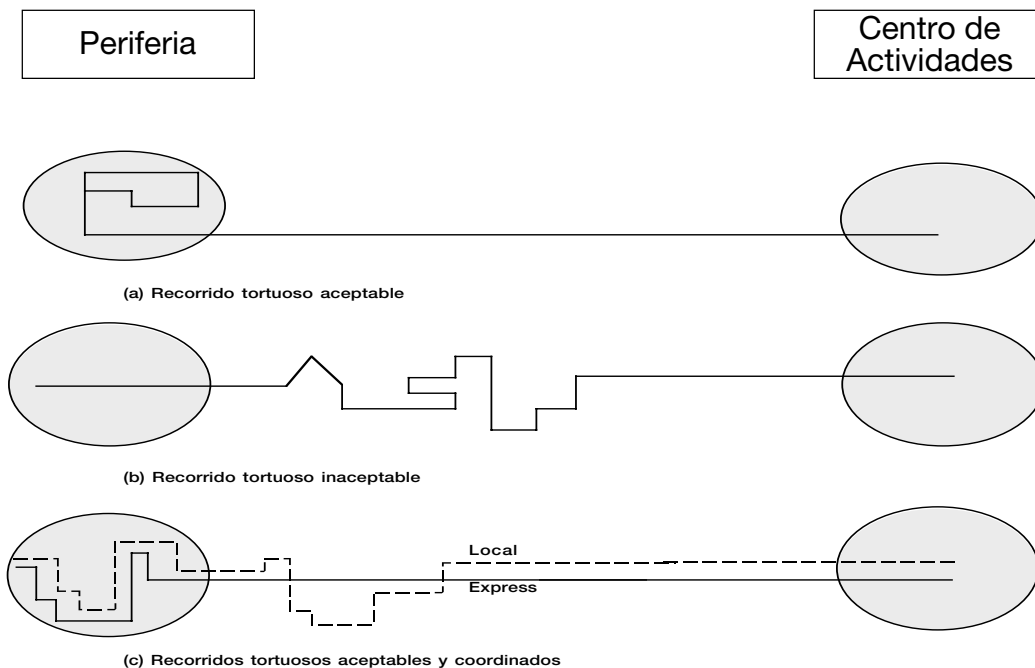


Figura 5.17.
Detalle del mapa de cargas en una red de transporte (Irapuato, México).

ción que ocurre frecuentemente en áreas de baja densidad donde la demanda de transporte es baja o se encuentra dispersa.

Donde la demanda es alta, es factible contar con rutas directas que provean una buena cobertura. Sin embargo, en áreas de baja demanda, el servicio se traduce en tiempos de espera demasiado largos (baja frecuencia) si solamente se utilizaran rutas directas. Cuando se requiere utilizar rutas sinuosas es deseable que su tramo sinuoso ocurra en los tramos periféricos de tal forma que el menor número posible de usuarios sufran recorridos innecesarios y con ellos tiempos mayores abordo de las unidades. La Figura 5.18 muestra tres ejemplos esquemáticos de la forma que pueden adoptar los recorridos. Así por ejemplo, se muestra una combinación de recorridos sinuosos que pueden complementarse para lograr viajes directos y una cobertura aceptable.

Esta situación puede normarse estableciendo la longitud del viaje (en tiempo o distancia) dentro de una base comparable como lo puede ser el automó-



Fuente: Referencia [4].

Figura 5.18.
Ejemplos de recorridos sinuosos en el transporte público.

vil para un determinado número de viajes. Es recomendable establecer que dicha longitud no se exceda en mas de un 20% del recorrido realizado en automóvil para cuando menos el 80% de todos los viajes que se efectúan en el transporte público [3].

5.2.4 Conectividad

Esta se expresa por el porcentaje de viajes que se pueden realizar sin transbordos y depende de los patrones de viaje y la red de transporte existente así como la relación entre rutas y líneas. Para ello es necesario definir la diferencia existente entre ruta y línea. Una ruta de transporte es un conjunto de vialidades por donde circulan unidades de transporte en servicio entre dos puntos terminales. Las líneas de transporte se conforman por las vialidades por donde opera una o mas rutas de transporte. En otras palabras, la longitud de ruta de una red es la suma de todas las longitudes de las rutas, mientras que la longitud de líneas es la suma total de los tramos de vialidades por donde circula el transporte público. Por lo tanto, la longitud de ruta puede ser igual o mayor que la longitud de línea.

La Figura 5.19 muestra una red de transporte operada de dos maneras diferentes. En el primer caso, solo operan dos rutas mientras que en el segundo caso cuatro rutas sirven a la misma vialidad. La longitud de línea son iguales para ambos casos, mientras que la longitud de ruta en el segundo caso es

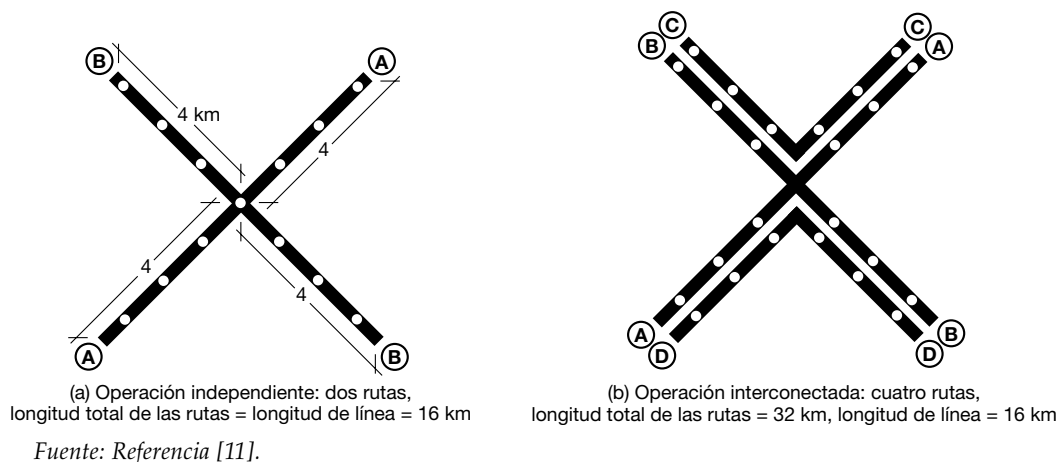


Figura 5.19.
Concepto de conectividad.

el doble que en el primer caso, mientras que la frecuencia en todas las líneas es la misma. El número de transbordos en el segundo caso son considerablemente menores que en el primer caso. Por lo tanto, la primera red presenta una menor conectividad, pero una mayor frecuencia en las rutas que la segunda red. El primer caso implica un mayor número de transbordos con un menor tiempo de espera que el segundo caso.

El grado de conectividad en una red de transporte también se expresa en función de la relación de su longitud de ruta contra su longitud de línea. Esta relación permite contar con una característica a nivel sistema mientras que el porcentaje de viajes que incluyen transbordos reflejan características de su utilización.

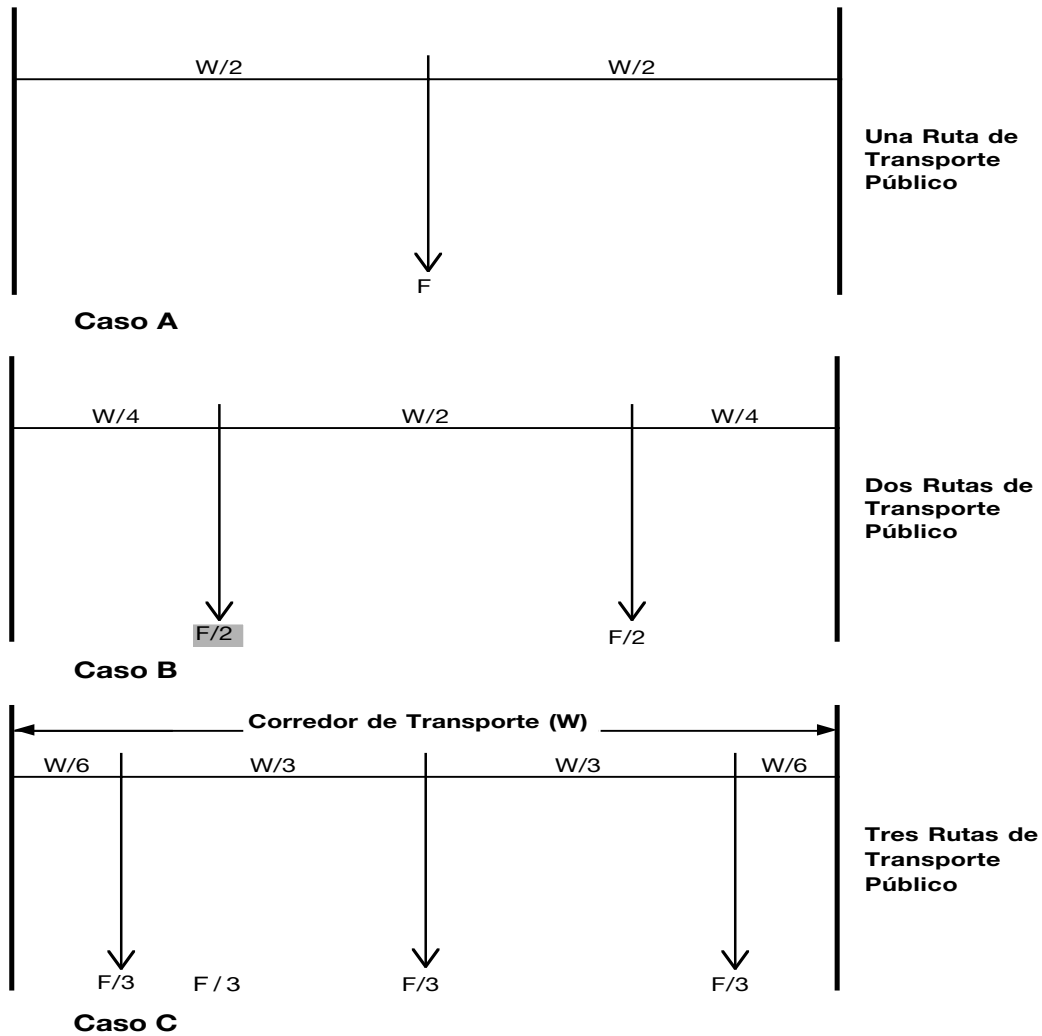
5.2.5 Densidad del servicio

Esta característica está estrechamente relacionada con las cuencas de transporte y describe que tan intensamente está servida un área urbana. Se puede medir por varios indicadores, tales como la longitud de línea, de ruta o los vehículos-kilómetro por hora que se prestan dentro del área de servicio.

La densidad de las redes de transporte, o kilómetros de red por kilómetro cuadrado de área está normalmente determinado como un balance entre la amplitud de la red y la frecuencia del servicio. Así por ejemplo, la línea que se muestra en la Figura 5.20 sirve un corredor (W) con una cuenca de transporte que tiene demanda para F vehículos por hora.

El servicio puede prestarse de diferentes maneras. En el primer caso, una línea presta el servicio lo que conduce a que la distancia máxima de caminata de cualquier punto dentro del corredor es $W/2$, mientras que la distancia promedio es de $W/4$, suponiendo una densidad de población uniforme a lo largo del corredor. La frecuencia en la línea es F . A su vez, en el segundo caso, el servicio lo proporcionan dos líneas, cada una con una frecuencia $F/2$. Esto da como resultado una distancia máxima de caminata de $W/4$ y el promedio de $W/8$. Por último, si se tienen tres líneas, se ofrece una frecuencia de $F/3$ unidades por hora en cada línea pero con un decremento en la distancia máxima de caminata a $W/6$ y en promedio de $W/12$. Por ello, el compromiso existente entre la distancia de acceso (caminata) y el tiempo de espera en la selección de la densidad de la red se hace obvio. Esto implica que el tiempo de espera es proporcional al número de rutas mientras que el tiempo de caminata es inversamente proporcional al número de rutas.

Se considera que una red está cercana a su situación ideal, en cuanto a cobertura y frecuencia cuando los tiempos de espera y de caminata son semejantes. Si el tiempo de espera supera al de caminata, es factible una reducción en los tiempos de espera si se reestructura la red y se reduce el número total de rutas. Si por el contrario, los tiempos de caminata superan los de espera,



Fuente: Referencia [4].

Figura 5.20.
Densidad del servicio.

entonces se recomienda incrementar la cantidad de rutas. Naturalmente, si ambos valores son semejantes, no se obtiene una ganancia apreciable [10].

Es interesante señalar que para cocientes de estos dos tiempos menores al 50% la reducción en el tiempo al corregir la red es significativo, mientras que con valores superiores al 70% la reducción que se logra al optimizar es despreciable. Para una red ortogonal, la distancia óptima entre rutas [10] viene dada por:

$$d = \frac{8000}{f}(1+i_i)$$

donde:

d = distancia entre rutas [m]

f = frecuencia media de las rutas [veh/h]

i_i = índice de irregularidad [-]

5.2.6 Transbordos

Aún cuando es deseable que se minimicen los transbordos entre rutas de transporte debido a que implica mayores tiempos de espera para el usuario, éstos representan un componente importante en los recorridos del transporte público. No existe una red de transporte que pueda servir a todos los viajes mediante rutas directas y sin transbordos. Cuanto mas transbordos existan, mucho mas fácil es diseñar y operar eficientemente las distintas rutas que conforman una red ya que cada ruta puede ser diseñada específicamente para cubrir determinadas condiciones físicas, de volumen y tipo de demanda.

La programación de los transbordos así como la planeación y el diseño adecuado de las instalaciones fijas repercuten tanto en la eficiencia del sistema como en la conveniencia que éste da al usuario y con ello su atracción hacia el sistema. Si el sistema provee de transbordos fáciles, sencillos, rápidos y convenientes entonces la red entera puede ser operada eficientemente y puede atraer a la mayoría de sus usuarios potenciales. Si, por otra parte, los puntos de transbordo están mal ubicados, mal diseñados, son inseguros y desagradables y sus itinerarios no están coordinados, los transbordos pueden ser un obstáculo que inhibe a un buen número de usuarios potenciales a utilizar el servicio de transporte.

En el análisis de los transbordos se deben considerar dos aspectos fundamentales, siendo éstos: el intervalo y el tipo de ruta que se trate. Las caracte-

rísticas del servicio que se examinan incluyen la conveniencia de efectuar los transbordos, el tiempo necesario para llevarlos a cabo, el número de transbordos posibles, su dirección y la importancia para el funcionamiento de diferentes redes de transporte.

5.2.6.1 Intervalo

Entre los factores que el usuario toma en cuenta para realizar sus decisiones sobre que medio de transporte va a utilizar está el intervalo ya que éste afecta directamente el tiempo de espera y de transbordo y por ello el tiempo total de recorrido. Bajo este orden de ideas, las rutas de transporte se pueden clasificar en aquéllas con intervalos cortos (≤ 10 min) y aquéllas con intervalos largos (> 10 min), situación que hace que los transbordos presenten las características que se señalan en el Cuadro 5.3.

Los transbordos de una ruta con intervalo corto a una que también presenta intervalo corto, implica tiempo de transbordo bajos y es típico en rutas con alta demanda. Por ello no es necesario buscar una coordinación entre horarios. Esta situación se presenta en el caso de rutas alimentadoras a una troncal.

En el caso de transbordos entre una troncal y una ruta alimentadora, los tiempos de espera pueden variar de muy pequeños a valores similares a los del intervalo largo en la ruta alimentadora. Por ello, la conveniencia al

Ruta de destino Ruta de origen	Intervalo corto	Intervalo largo
	Intervalo corto	Intervalo largo
Intervalo corto	Caso I Tiempos de transbordo cortos y convenientes	Caso III Varía se requiere información sobre conexiones
Intervalo largo	Caso II Tiempos de transbordo cortos y convenientes	Caso IV Varía dependiendo del intervalo 1. Igual y simultáneo Transbordos convenientes 2. Igual pero no simultáneo Transbordos en una dirección convenientes si se coordinan 3. Diferentes Imposibles de coordinar; tiempo de transbordo largo

Cuadro 5.3.

Tiempo de transbordo entre rutas con intervalos largos y cortos.

usuario varía aleatoriamente, situación que puede controlarse cuando se ofrecen a los usuarios los horarios para todas las rutas, de tal forma que pueda planear su viaje y abordar la unidad en la troncal que conecta a la ruta alimentadora con la demora mínima. Finalmente, los transbordos entre rutas con intervalos largos varían según sean éstos iguales y simultáneos; iguales pero no simultáneos; y diferentes.

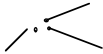





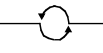





5.2.6.2 Tipo de ruta

En el análisis de los transbordos se deben considerar dos aspectos fundamentales en cuanto a la configuración de las rutas. Un primer aspecto se refiere a la relación de cada ruta con su punto de transbordo, es decir, es importante conocer si la ruta termina en el punto de transbordo o es una ruta de paso. Esto da origen a que se clasifiquen las rutas como rutas terminales y rutas de paso.

El segundo aspecto se refiere a la similitud de las rutas en cuanto a su intervalo, a su capacidad, a sus características físicas, entre otros aspectos o bien, si una de ellas es una ruta troncal con una mayor frecuencia, capacidad y desempeño que las rutas alimentadoras, las cuales realizan una función de recolección y distribución del pasaje y concentran el mismo en los puntos de transbordo [11, 12].

Las rutas suburbanas o regionales de autobuses que se reúnen en algún punto en muchas ocasiones presentan una operación similar, mientras que el caso de una ruta troncal con una o varias rutas alimentadoras ocurre en puntos donde convergen éstas. Casos típicos de este último esquema son los que se presentan en las estaciones terminales del metro de la Ciudad de México en donde un buen número de rutas suburbanas y, en algunos casos, foráneas tienen su terminal y proceden a transbordar a un medio de transporte de mayor capacidad. Se debe señalar que la ruta troncal debe presentar una mayor capacidad que las alimentadoras, con la finalidad de absorber adecuadamente la afluencia de los usuarios durante las horas de máxima demanda.

El Cuadro 5.4 describe las características de los transbordos clasificados conforme a los tipos de rutas. En él, los tres primeros casos se presentan combinaciones de las rutas terminales y de paso, expresados en términos generales (n rutas), mientras que los tres restantes ejemplifican los casos mas simples que se pueden presentar. Es importante aclarar que todos los casos se presentan para dos tipos de situaciones: para rutas terminales y para la combinación de rutas troncales y rutas alimentadoras y éstos se comentan a continuación:

Caso	Número de rutas		Permutaciones de transbordo	Rutas similares			Troncal con alimentadoras		
	Terminales	De paso		Croquis	Caso Típico	Comentario	Croquis		
1	N_e	0	$N_e (N_e - 1)$		Terminales de rutas suburbanas	Se requiere coordinación entre rutas la cual se puede lograr fácilmente			
2	0	N_i	$4N_i (N_i - 1)$		Cualquier punto con varias rutas que se intersecten	Es deseable coordinar los transbordos pero ocasiona demoras a los usuarios de paso			
3	N_e	N_i	$(N_e + 2N_i)^2$ $(N_e + 4N_i)$		Rutas que terminan o se intersectan	Es deseable la coordinación de transbordos y se puede lograr mas fácilmente que en el caso 2			-
4	2	0	2		Punto terminal de dos rutas suburbanas	-		Troncal con alimentador	-
5	0	2	8		Punto de cruce de dos rutas	-		Troncal con una ruta alimentadora que la intersecta	-
6	1	1	4		Punto donde una ruta termina y la otra es de paso	-		Troncal con una ruta que termina	-

Fuente: Vukan R. Vuchic, Angel Molinero y Richard Clarke. *Timed Transfer System: Planning, Design and Operation*. Washington DC: UMTA, 1981.

Cuadro 5.4.

Clasificación de los transbordos por tipo de ruta.

Caso 1. Este se presenta cuando todas las rutas N_e que llegan a un punto de transbordo terminan en dicho punto, teniéndose un total de K transbordos:

$$K = N_e \times (N_e - 1)$$

Este tipo de transbordo es el caso típico para la utilización de un Sistema de Transferencias Coordinadas el cual se comenta mas adelante con el que se logra minimizar las demoras al usuario e integrar la red de transporte. Un ejemplo típico es aquél en donde se reunen varias rutas suburbanas o regionales en una terminal común. Las rutas pueden ser similares en cuanto a sus características o bien rutas suburbanas de frecuencia baja que se conectan en una línea troncal. Este caso es notorio en algunas terminales del metro de la Ciudad de México, como lo son Pantitlán, Cuatro Caminos, Martín Carrera e Indios Verdes.

En el caso de rutas alimentadoras que terminan en una ruta troncal el uso de un sistema coordinado facilita los transbordos entre alimentadoras pero crea cargas no equilibradas en la línea troncal. Esto se debe a que los intervalos de la troncal son mas cortos que los de las alimentadoras y por ende algunas unidades de la troncal no se coordinan con las alimentadoras, mientras que otras absorben toda la carga de las alimentadoras. Esto induce a señalar que solo debe ser utilizado si existen transbordos substanciales entre alimentadoras y cuando sea posible, dividir en grupos de dos o tres que se reunan simultáneamente. Si los transbordos son reducidos, las rutas alimentadoras deben espaciarse para proveer un balance en la troncal. Naturalmente, si existen rutas alimentadoras con una baja demanda que se transfiere a una línea de alta capacidad, el problema de balanceo de cargas se elimina.

Caso 4. Esta situación representa dos rutas con una terminal común y es el caso mas sencillo. El número de transbordos posibles son dos: uno de la ruta A a la ruta B y viceversa.

Caso 2. Este caso representa los puntos de transbordo donde todas las rutas de paso N_i pasan por el punto de transbordo. La cantidad de transbordos K es:

$$K = 4N_i \times (N_i - 1)$$

Para el caso de solamente dos rutas (*caso 5*) se presentan 8 transbordos posibles. Por lo tanto, es recomendable organizar las rutas en las cuales hay un número apreciable de transbordos y que muestran intervalos similares. Debe tenerse presente que al encontrarse este punto de transbordo en un tramo intermedio de las rutas, se originan demoras a los pasajeros que no transbordan lo que obliga a la elaboración de itinerarios precisos, a prestar una operación confiable y al diseño conveniente de los puntos de transbordo.

Los transbordos entre una línea troncal y las rutas alimentadoras que la intersectan deben ser organizadas de manera diferente cuando los intervalos de la línea troncal son amplios como en el caso de un transporte regional o foráneo. Al no ser factible o deseable ocasionar demoras a las unidades que transitan sobre la línea troncal, las rutas alimentadoras deben ser programadas de tal forma que los vehículos lleguen con cierta anticipación a los de la troncal y salgan poco después de que parta la troncal. De esta manera, la troncal no se ve afectada, mientras que las alimentadoras se ven demoradas, pero en una proporción menor.

Caso 3. Este caso representa la situación mas general ya que en un punto de transbordo se reunen tanto rutas N_e terminales como rutas N_i de paso. Esto origina que se produzcan K transbordos, cuyo valor viene dado por:

$$K = (N_e + 2N_i)^2 - (N_e + N_i)$$

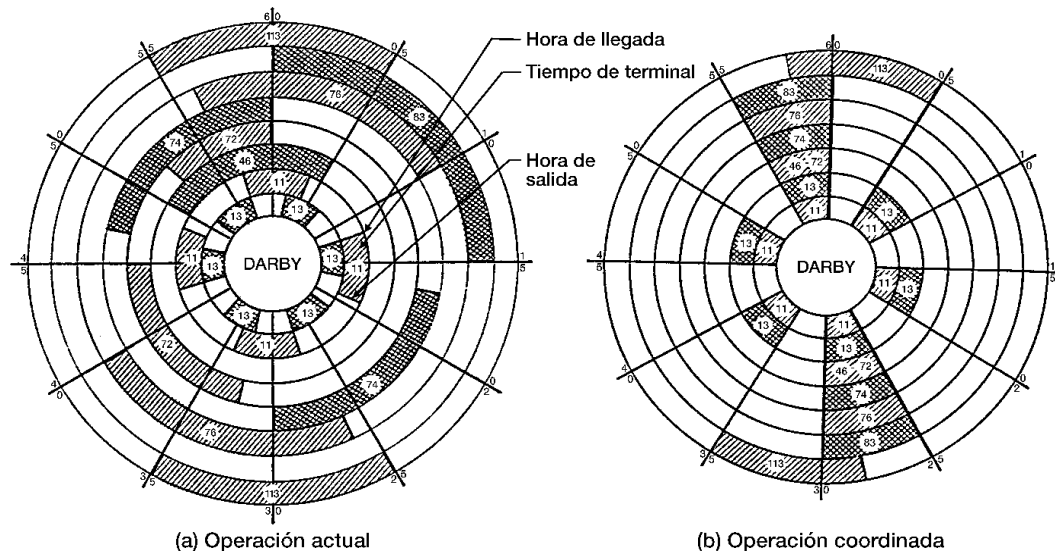
Caso 6. El Cuadro 5.4 anterior presenta la situación mas sencilla de transbordos entre una ruta terminal y una de paso, lo cual origina únicamente cuatro transbordos posibles siendo su coordinación factible si los vehículos en la ruta terminal llegan antes y salen después que los vehículos en la ruta de paso que cruza el punto de transbordo. Esta condición es similar a aquélla donde las rutas alimentadoras intersectan a una línea troncal, con la diferencia de que no se produce una demora adicional en ninguna ruta ya que el tiempo en el cierre de circuito de la ruta terminal se utiliza para traslapar la llegada de la ruta de paso.

El análisis de transbordos muestra la variedad de condiciones que se presentan en sus puntos de contacto. Para lograr transbordos convenientes y ofrecer un servicio integrado en la red de transporte es necesario que se analicen los tipos de rutas, las relaciones entre rutas, los movimientos de transbordos entre rutas, los intervalos, los tiempos de traslape entre rutas así como sus tiempos de terminal. A su vez, la longitud de las rutas deben analizarse para que durante la preparación de itinerarios se logren velocidades de operación adecuadas que eviten tiempos de terminal excesivos.

Una red de transporte que desarrolla un adecuado sistema de transbordos permite enfatizar las siguientes tres aseveraciones:

- una red puede operar económicamente y puede ofrecer una mayor frecuencia con transbordos que si éstos se evitan
- las estaciones o puntos de transbordo pueden integrarse fácilmente a las terminales foráneas de transporte, centros comerciales o administrativos y;
- las protestas del usuario a los transbordos se reducen si se diseñan y operan correctamente.

La Figura 5.21 muestra los esquemas de operación para un punto de transbordo en donde la carátula de reloj indica la hora de llegada y salida de cada unidad. La Figura 5.21a presenta el programa actual de operación sin coordinación mientras que la Figura 5.21b presenta el mismo esquema con una ope-



Fuente: Referencia [11,12].

Figura 5.21.

Esquemas de operación en un punto de transbordo (Darby, Pennsylvania, EEUU).

ración coordinada. Si bien este tipo de operación requiere un parque vehicular un poco mayor (estimado en un 10 % adicional al que se cuenta en la situación actual) el nivel de servicio, la conveniencia al usuario y los tiempos de espera se mejoran significativamente [11].

5.2.7 Velocidad

Esta característica es uno de los elementos primordiales para determinar el nivel de servicio desde el punto de vista del usuario y por ende, de la atracción de pasajeros que puede tener una ruta. Asimismo, afecta los costos de operación de la ruta e indirectamente a la comunidad.

En particular, el usuario se ve afectado por la velocidad de operación, la cual es la que se logra a lo largo de una ruta entre sus dos puntos terminales. Si la longitud del derrotero es L y el tiempo de recorrido entre puntos terminales es t_r , la velocidad de operación resulta:

$$V_o = \frac{(60 \times L)}{t_r}$$

donde:

- V_o = Velocidad de operación [km/h]
 L = Longitud del derrotero [km]
 t_r = Tiempo de recorrido [min]

Por otra parte, el prestatario del servicio está interesado en la velocidad comercial puesto que afecta directamente el número de vehículos requeridos para determinado servicio y por lo tanto tiene una influencia directa en sus costos de operación y en la productividad laboral.

A diferencia de la velocidad de operación, ésta incluye el tiempo de terminal así como los tiempos de recorrido en ambos sentidos. Por ello, la velocidad comercial es menor o igual a la velocidad de operación. Así tenemos que:

$$V_c \frac{(60 \times L)}{(t_t + t_r)} \leq V_o$$

donde:

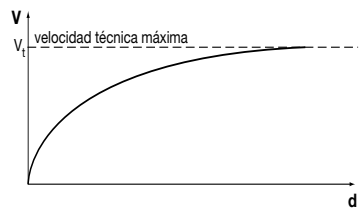
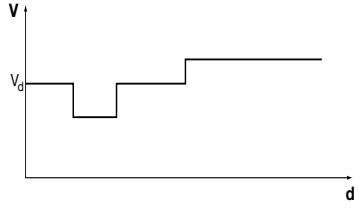
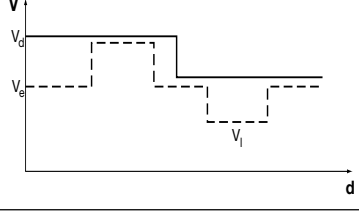
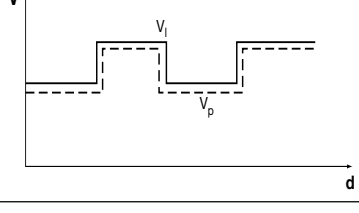
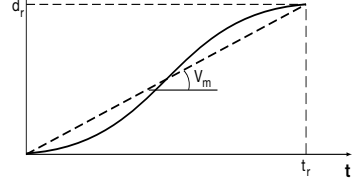
- L = Longitud del derrotero, ida y vuelta [km]
 t_r = Tiempo de recorrido, ida y vuelta [min]
 t_t = Tiempo de terminal [min]

La velocidad es un componente importante del rendimiento de los viajes y puede ser utilizado para comparar los rendimientos de líneas o sistemas diferentes. Esto es de particular importancia no solo para comparar las velocidades de viaje sino que también para evaluar los tamaños del parque vehicular y la utilización de los vehículos. Por ello, los diferentes tipos de velocidad [1] que pueden ser definidos son:

Velocidad técnica máxima	V_t
Velocidad de diseño	V_d
Velocidad legal	V_l
Velocidad programada	V_p
Velocidad de marcha	V_m
Velocidad estación a estación	V_{ee}
Velocidad de operación	V_o
Velocidad comercial o de viaje redondeo ..	V_c
Velocidad de plataforma	V_f
Velocidad de origen-destino	V_{od}

Velocidad de punto V_{pto}

La velocidad (V) se define entonces como la velocidad que una unidad de transporte tiene en cualquier momento a lo largo de la línea. El dimensionamiento de la velocidad se da normalmente en km/h y en algunas veces m/seg. El Cuadro 5.5 muestra los diferentes tipos de velocidades y la utiliza-

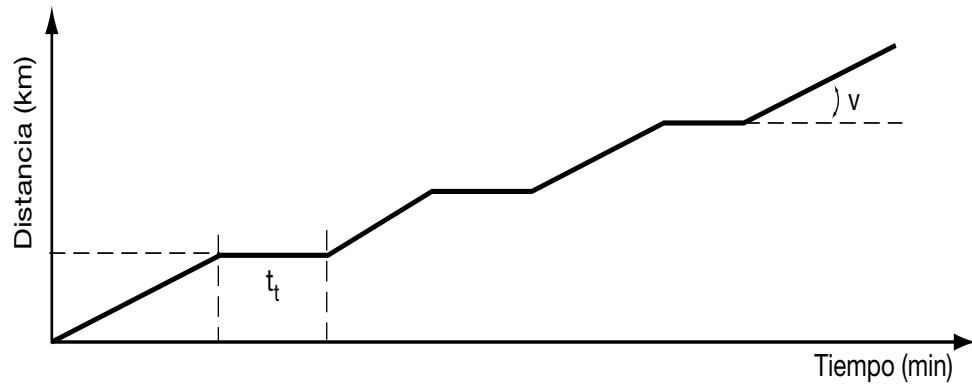
TIPO DE VELOCIDAD	GRAFICA	DEFINICION	UTILIZACION	COMENTARIOS
Técnica máxima V_t		Velocidad máxima que puede alcanzar un vehículo en una línea recta sin pendientes, bajo condiciones normales cuando la velocidad máxima es aplicada y la aceleración ha cesado gradualmente.	Elemento descriptivo del rendimiento del vehículo	En muchos casos puede ser utilizada debido a las condiciones a lo largo de la ruta o espaciamientos cortos entre estaciones.
De diseño V_d		Velocidad máxima que un vehículo puede alcanzar en determinada sección con una adecuada seguridad cuando imperan las condicionantes físicas.	Planeación de nuevas líneas y sus características. Base importante para decidir la velocidad legal	Varía conforme a las secciones y direcciones, geometría, pendiente, etc. $V_d = V_t$ $V_d \neq V_l$
Legal V_l		Velocidad máxima que un vehículo puede alcanzar en determinada sección con una adecuada seguridad cuando imperan las condicionantes físicas.	Para mantenerse así como incrementar, la seguridad en una línea.	El tránsito, el mantenimiento y otros factores restringen la velocidad. Pueden variar con el tiempo. $V_l \leq V_d$
Programada o de sección de bloque V_p		Velocidad promedio máxima que un vehículo puede alcanzar en una línea con control automático de velocidad, sin recibir la orden de frenar (manual o automático).	Para obtener la velocidad óptima en determinado sector o línea.	Debe acercarse lo más posible a V_t . $V_p \leq V_l$
De marcha V_m		Velocidad promedio que un vehículo puede alcanzar desde que sale de una estación hasta que llega a la siguiente. d_r = distancia entre centros de plataforma o parada (m). t_r = tiempo de recorrido (min).		Se considera la aceleración y desaceleración pero no el tiempo de parada.

ción que presenta cada una.

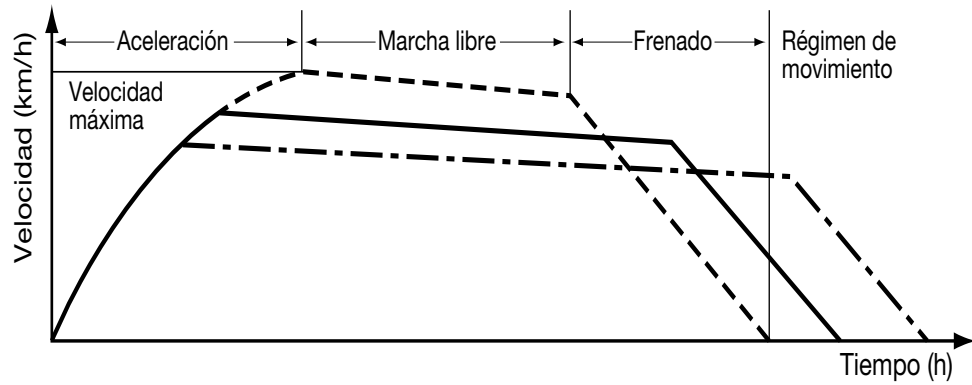
Diagramas utilizados para definir las velocidades. Se utilizan tres tipos de diagramas diferentes [13]:

- Diagrama tiempo/distancia
 - Diagrama tiempo/velocidad
 - Diagrama distancia/velocidad
- **Diagrama de tiempo/distancia.** El tiempo aparece en el eje de las abscisas y la distancia en el eje de las ordenadas. Por ello los tiempos terminales y de parada aparecen en el diagrama. Se recomienda este diagrama para describir la velocidad a lo largo de la línea completa. La Figura 5.22a muestra este diagrama.
 - **Diagrama tiempo/velocidad.** El tiempo aparece, en el eje de las abscisas y la velocidad en eje de las ordenadas. Los tiempos terminales y de parada en las estaciones o paradas aparecen en el diagrama. Este diagrama se usa principalmente para describir el rendimiento deseable del vehículo y tiempo de recorrido para una determinada línea bajo ciertas condiciones. La Figura 5.22b ilustra esta gráfica.
 - **Diagrama de distancia/velocidad.** Tiene la distancia en el eje de las abscisas y la velocidad en el eje de las ordenadas. Las longitudes de las plataformas de las estaciones y sus ubicaciones son dadas. Este diagrama es conveniente para describir la velocidad de un vehículo en todos los puntos a lo largo de una línea permitiendo programar los regímenes de frenado, la ubicación de señales, entre otros. Las señales, estaciones y todas las otras condiciones que influyen la velocidad se incluyen en el diagrama. La Figura 5.22c presenta este diagrama.

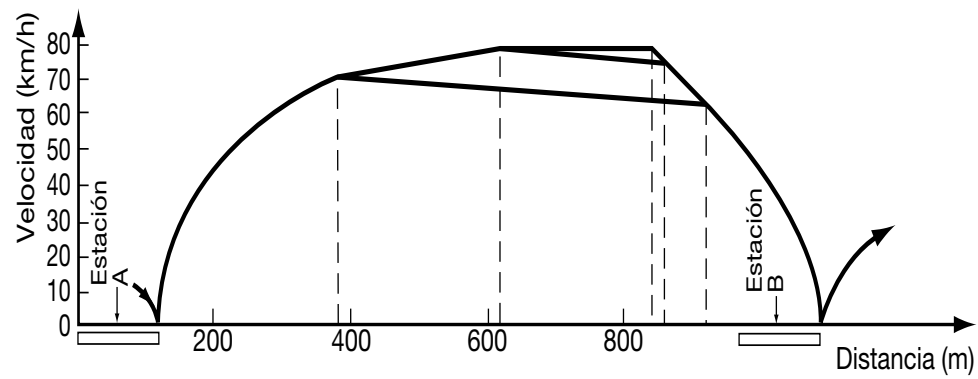
Los incrementos en la velocidad son aspectos deseables tanto para el transportista como para el usuario ya que una mayor velocidad implica menor tiempo de recorrido y, en algunos casos, la reducción del parque vehicular requerido, lo cual trae aparejado una reducción tanto en los costos de operación como de inversión. Asimismo, el incremento de la velocidad puede ser factor importante para atraer y ganar nuevos usuarios.



(a) Tiempo-Distancia



(b) Tiempo-Velocidad



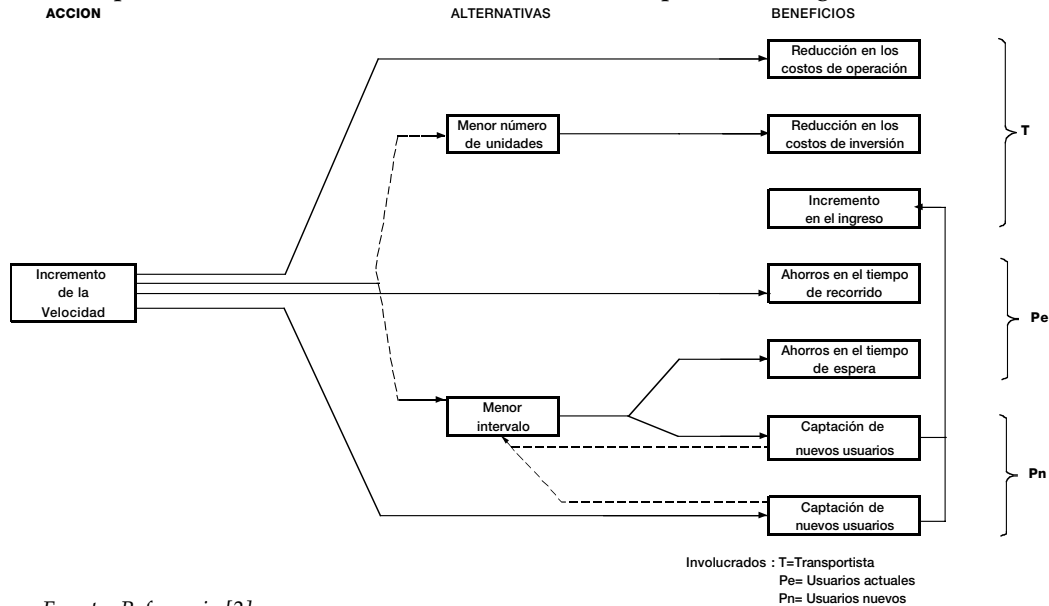
(c) Distancia-velocidad

Figura 5.22.
Diagramas de velocidad.

Un buen número de modificaciones físicas y operacionales pueden dar lugar a un incremento en la velocidad por lo que el transportista o planeador debe analizar cuales son aplicables al sistema bajo estudio. Entre los cambios mas importantes están:

- El diseño de la unidad y sus características de desempeño (circulación interior, altura del piso y número de canales en los accesos; características dinámicas).
- Diseño y operación de intersecciones y vialidades (señalamiento, diseño y control de intersecciones, prohibición de estacionamiento, carril exclusivo).
- Paradas (espaciamiento, alternancia en la ubicación de las paradas).
- Operación del transporte público (forma de cobro, trazo, esquemas de parada).

Por ello, la evaluación de las consecuencias de un incremento en la velocidad hace necesario determinar que tanta inversión se requiere en una medida de tal forma que justifique agilizar el transporte público y determinar quienes serán los beneficiarios, entre otros aspectos. La Figura 5.23 muestra la



Fuente: Referencia [2].

Figura 5.23.
Incremento a la velocidad.

conceptualización de las consecuencias de un incremento en la velocidad [2].

5.2.8 Infraestructura

La infraestructura de una red de transporte consiste en todas las instalaciones fijas necesarias para prestar un servicio adecuado. Naturalmente, ésta incluye las unidades de transporte, las terminales y paradas, los talleres de mantenimiento, los derechos de vía y otras inversiones de capital. La infraestructura está determinada básicamente por las características de la demanda, el nivel y la calidad del servicio que el operador pretende lograr y la situación financiera que prevalece en la comunidad. Las áreas con baja demanda deben presentar una inversión a la infraestructura del mismo orden. En estas áreas el servicio generalmente será provisto por una flota de autobuses o minibuses, mismos que dependerán del hecho de lograr altos factores de carga y una frecuencia adecuada en función del tamaño de la unidad.

Una administración interesada en su transporte público normalmente visualiza la inversión en infraestructura adicional como un proceso evolutivo que mejora la calidad del servicio poco a poco. El usuario cautivo y potencial verá con mejores ojos a una red en la que operan vehículos nuevos y bien mantenidos, en la que se cuenta con derechos de vía reservados al transporte público y terminales adecuadamente diseñadas que una red en la que se tienen frecuencias similares pero que carece de estas instalaciones.

5.2.9 Costos de operación

Estos costos se ven afectados por el diseño de la red de varias maneras. Primeramente, la extensión de las rutas y sus traslapes (sobrepisos) en los tramos troncales deben ser plasmados de tal forma que se logren factores de carga consistentes a lo largo de la red. Asimismo, los derroteros deben seguir las vialidades o derechos de vía que presentan el menor congestionamiento posible así como el menor número de interferencias.

En el análisis de los costos de operación, las plantillas, sus funciones y los datos operativos son los puntos de partida para un análisis de este tipo. Entre las tendencias que deben revisarse están las siguientes:

- **Productividad laboral.** Esta está afectada por el *Contrato Colectivo de Trabajo* y las reglas de trabajo así como el perfil del servicio por período del día. Si no se anticipan cambios, los índices de productividad

laboral (horas de pago reales entre horas de pago programadas) deben permanecer sin cambios.

- **Costos generales y administrativos.** Muchas empresas de transporte han encontrado que estos costos no aumentan en la misma proporción en que crece el servicio. Algunos de estos costos son virtualmente fijos.

5.3 Redes de transporte en áreas de baja densidad

Por su propia naturaleza, el transporte público opera eficientemente donde existe cierta agregación de la demanda de viajes. Puesto que en las áreas de baja densidad la tenencia de automóviles tiende a ser alta, la demanda de viajes por transporte público se presenta de tal forma que los transportistas encuentran difícil proveer un nivel de servicio adecuado en ciudades con una baja densidad a un costo aceptable [11, 12]. Tal es el caso de las ciudades medias mexicanas donde el 50 al 60% de los movimientos se realizan en transporte público, contra un porcentaje superior al 80% de los movimientos en transporte público en ciudades de mayor tamaño.

Por ello, se considera que el transporte público puede desempeñar dos diferentes papeles en áreas de baja densidad:

- *Proveer la movilidad primaria para aquéllos que no tienen acceso al automóvil.* Este segmento de la población no es despreciable en nuestras ciudades y cuando existe este servicio, puede proveer un número substancial de viajes a la escuela, al trabajo o de compras.
- *Proveer un servicio alternativo al usuario que tiene acceso al automóvil.* Esto es factible si se proporciona un nivel de servicio competitivo con el automóvil.

5.3.1 Problemática del transporte público en áreas de baja densidad

La situación que guarda el transporte público en este tipo de áreas muestra que estos servicios son, en la mayoría de los casos, deficientes. El servicio de taxis puede servir solamente a una fracción muy pequeña de la población. A su vez, el servicio de transporte público, cuando existe, ofrece una cobertura limitada y un servicio irregular tanto en los horarios como en la coordinación

de los transbordos. Como resultado, el transporte público se vuelve inconveniente para muchos viajes, particularmente si los orígenes y destinos del usuario no coinciden con una ruta dando lugar a que se realicen los transbordos sin una infraestructura adecuada o sin la coordinación en los horarios.

La dificultad fundamental de dar un servicio de buena calidad en el transporte público en áreas de baja densidad se centra en que la baja afluencia de pasaje hace que mejoras como una mayor densidad de la red o mejores frecuencias de servicio, sean difíciles de justificar, lo que hace que los subsidios por pasajero sean normalmente mayores que en las áreas internas de una ciudad.

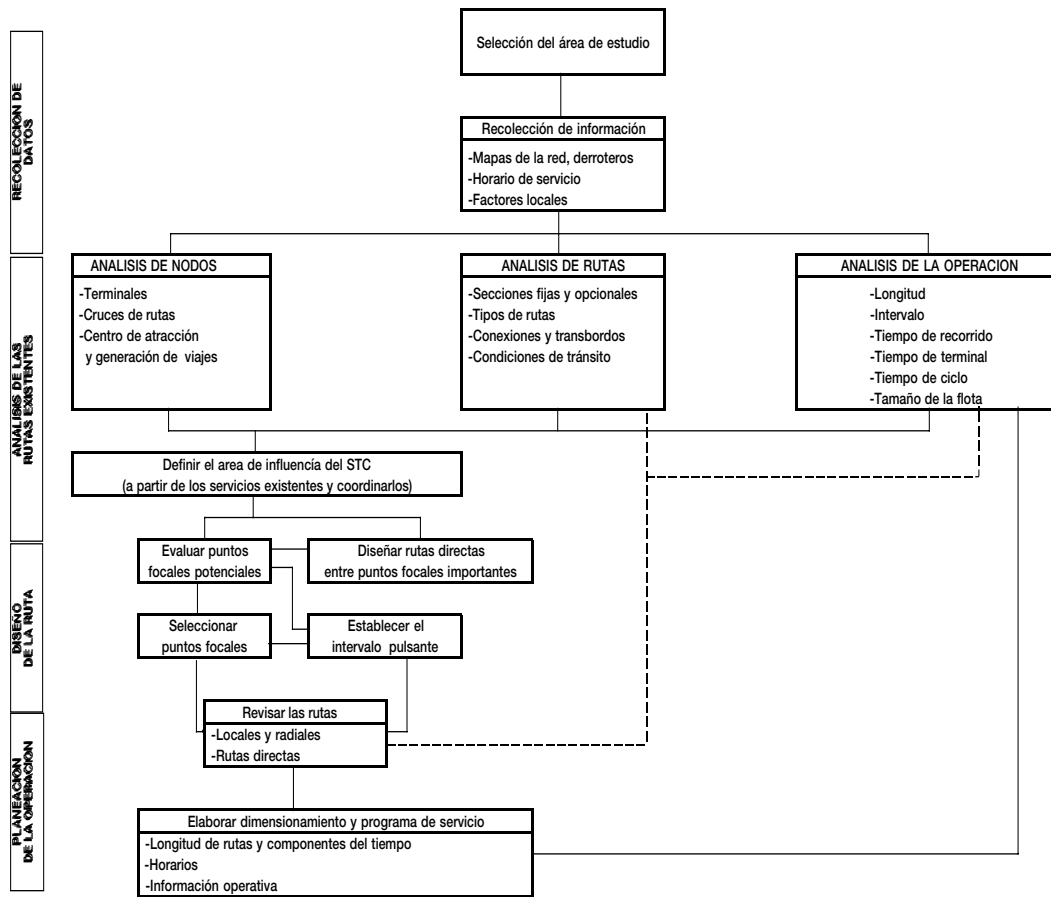
Es importante señalar que el problema de generar un número adecuado de usuarios para mantener una frecuencia de servicio aceptable se relaciona con la misma densidad poblacional. Una menor densidad implica un menor número de usuarios en la cuenca de servicio de cualquier ruta. Por ello, una de las soluciones puede ser la adopción de un sistema de transferencias coordinadas donde el esquema de servicio pasa de un sistema de rutas individuales –sin coordinación o interacción alguna– a una red integrada que puede atraer una mayor afluencia que la que actualmente se presenta en las áreas de baja densidad.

5.3.2 Sistema de transferencias coordinadas

Este esquema operativo implica la reestructuración de una red de transporte público cuya característica principal consiste en reducir y aun eliminar las demoras del usuario al momento de realizar una transferencia entre rutas de baja frecuencia. Esto implica naturalmente la convergencia simultánea de las unidades de transporte en los puntos de transbordo.

A continuación se describen someramente los pasos a seguir para la planeación de un sistema de esta naturaleza.

Planeación de un sistema de transferencias coordinadas (STC). Se consideran dos opciones: su aplicación en una red existente o bien, el desarrollo integral de una red con estas características, donde las principales diferencias entre una u otra opción son las relativas a la información requerida y al énfasis que se le da al análisis de las rutas existentes para una red en operación y la planeación inicial de las rutas para una nueva red. La Figura 5.24 ilustra el esquema recomendado para su aplicación en una red existente.



Fuente: Referencia [12].

Figura 5.24.
Metodología para la conformación de un Sistema de Transferencias Coordinadas.

Recolección de información. Esta recolección incluye la selección del área donde el STC tiene la posibilidad de implementarse, así como la obtención de la información sobre las redes de transporte existentes, el uso del suelo en el área, la red vial y las condiciones del tránsito, las características operativas de las redes y rutas así como las características de la demanda. Estas características deben incluir los estudios respectivos para obtener los polígonos de carga o perfiles de abordaje y descenso de las rutas, así como la definición de la sección de máxima demanda.

Análisis de las rutas actuales. Se realiza un análisis de los nodos (puntos de transbordo), rutas y la operación misma de la red, siendo básica la selección de los nodos de convergencia o puntos de transbordo para los usuarios. Se deben seleccionar las ubicaciones potenciales a partir de las consideraciones de puntos donde el usuario se ve atraído, aspecto que determinará el éxito de estos puntos de transbordo. Como puntos sobresalientes a ser estudiados están las terminales regionales (autobús, ferrocarril); los cruces de dos o mas rutas; los centros comerciales donde se presenta una demanda alta y centros regionales importantes (por ejemplo, las centrales de abasto).

El análisis de las rutas incluye la determinación de las secciones esenciales de cada ruta y cuales son opcionales. Una sección esencial se presenta donde la demanda es tal que se requiere del servicio. Generalmente, una vialidad principal o carretera forma un corredor de viajes que requiere un servicio de transportación pública a lo largo de dicha ruta.

Una sección opcional se presenta donde al reajustar o quitar el servicio solamente se presenta un impacto menor en los niveles de servicio del área, como lo son a lo largo de calles locales, en los extremos de las rutas o donde se presentan desviaciones notorias e innecesarias de la trayectoria mas directa.

Asimismo, se deben establecer los tipos de rutas (directas o express, locales y radiales) en la red para facilitar la preparación de los itinerarios. Las *rutas directas* deben conectar los puntos de transferencia seleccionados siguiendo la ruta mas corta posible entre ellos. Las *rutas locales* deben complementar el servicio que prestan las rutas directas. Finalmente, las *rutas radiales* serán aquéllas que llegan a un solo punto de transferencia.

Diseño de la red. Una vez seleccionados los puntos potenciales de transbordo, éstos se evalúan y se procede al diseño de las rutas directas que conectan a cada nodo, dando lugar a la definición y a los diseños preliminares, de cada uno de los puntos de transferencia. Sin lugar a dudas, el aspecto mas importante desde un punto de vista operacional será la selección del *intervalo pulsante* (tiempo entre salidas coordinadas en un punto determinado), para todas aquéllas rutas que llegan al punto de transferencia [11,12,14].

En la selección de este intervalo se presentan dos factores principales: la afluencia de usuarios y el intervalo máximo aceptable. Por tal motivo, al planear un STC, se considera la demanda, el nivel requerido de servicio (intervalo máximo permisible) y la regularidad esperada del servicio en cada una de las rutas.

El intervalo pulsante seleccionado debe estar lo mas cercano posible a los

intervalos que son óptimos para la mayoría de las rutas en un sistema convencional. Generalmente, se recomienda la selección de un intervalo pulsante mayor que uno menor al que se presta en el momento de rediseñar la red. Una vez realizados estos análisis, se revisan las rutas y se planean las rutas locales y radiales.

Las llegadas y salidas de las unidades a los puntos de transbordo focales son por pulsos ya sean simultáneos o alternados. El primer caso se presenta cuando dos o mas puntos focales en la red pulsan o envían unidades a operar al mismo tiempo. En el segundo caso, el tiempo de pulso se alterna entre los puntos focales. Estos conceptos se muestran en la Figura 5.25 para una red bifocal. El significado de estos dos tipos de operación para el diseño de una red de STC es que se presentan diferentes relaciones entre:

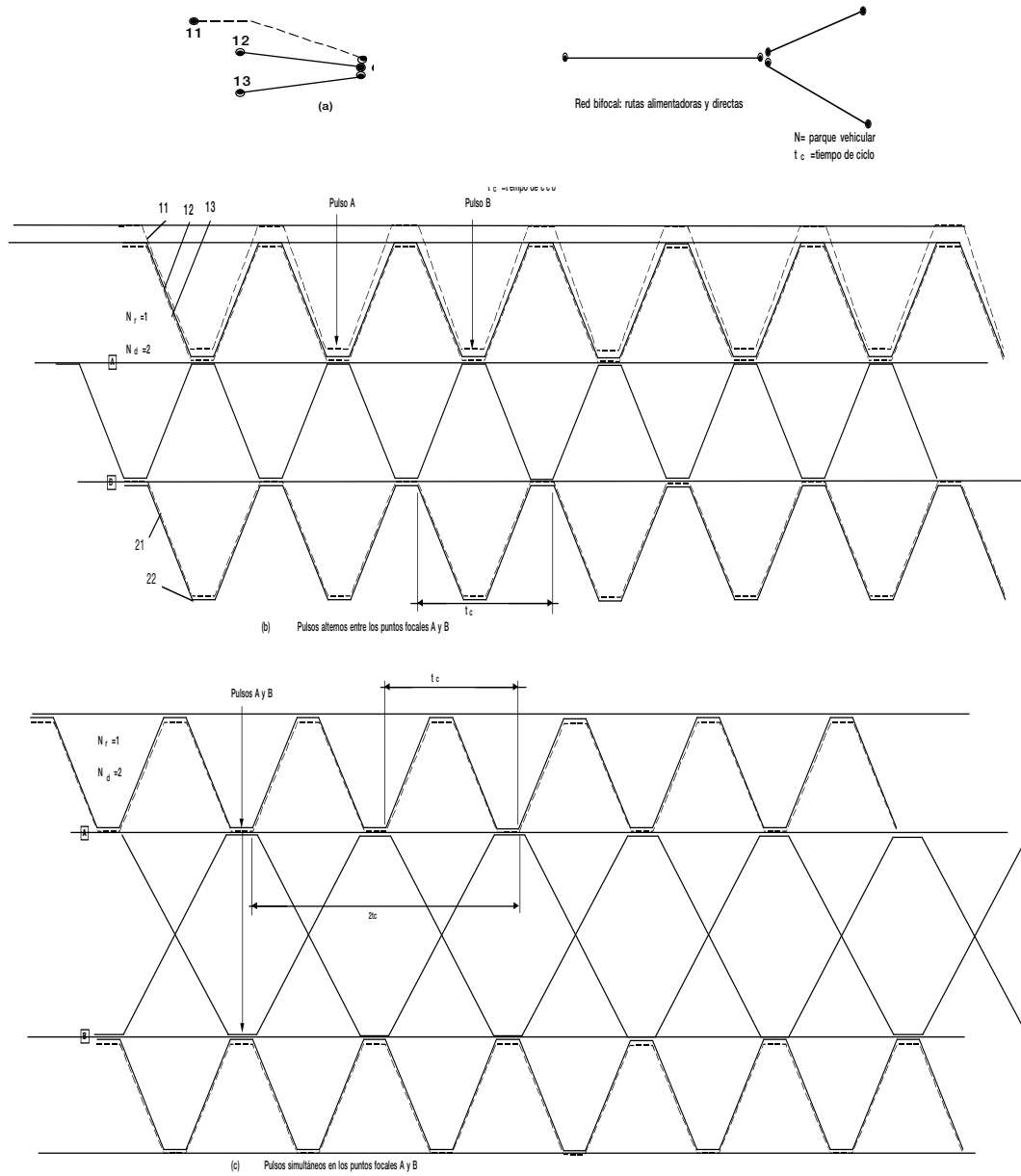
- El tiempo de ciclo t_c
- La longitud de la ruta, L
- La velocidad comercial, V_c
- El parque vehicular, N

De esta forma, se tienen varias opciones en la selección de los puntos focales y sus forma de operación. La Figura 5.26a muestra una operación alterna al momento que el cierre de circuito A está pulsando. A su vez, la Figura 5.26b muestra una operación con puntos simultáneos de los dos puntos focales.

Diseño de la operación. En esta etapa se desarrollan los programas de operación y la elaboración de horarios. Cada ruta debe revisarse de tal manera que se ajuste lo mas posible al intervalo pulsante de tal forma que se cumplan los requerimientos de un STC. Para algunas rutas esto puede resultar en una operación ineficiente, especialmente si su intervalo es mayor que el intervalo pulsante.

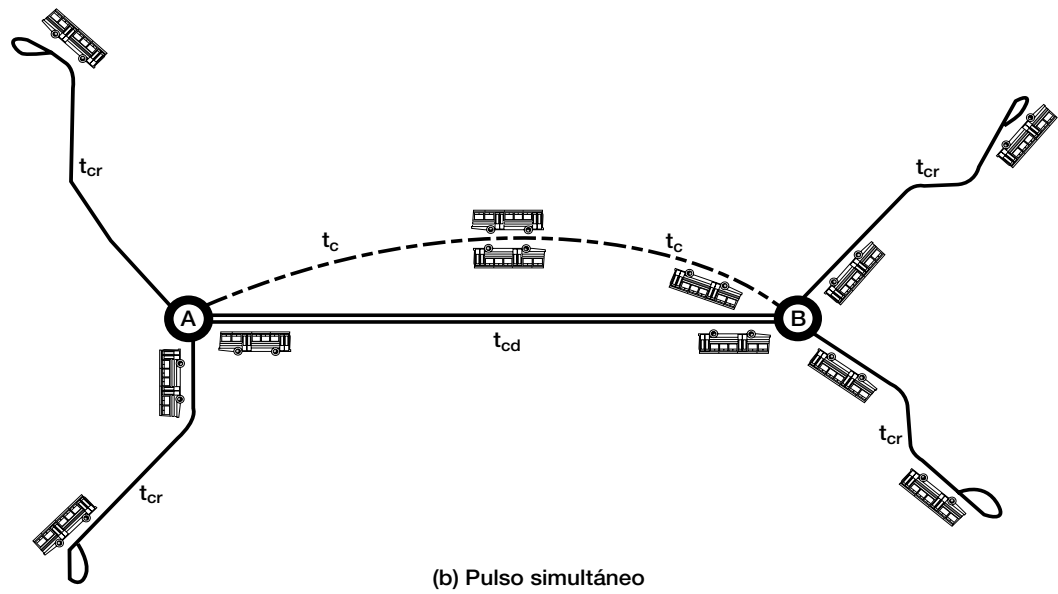
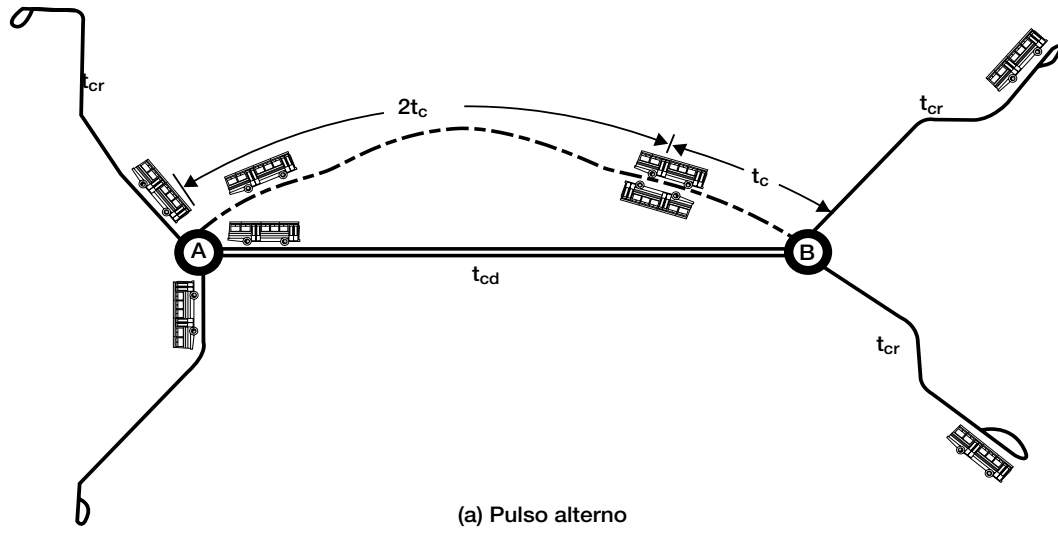
Una vez que se cuenta con la información de cada ruta y se selecciona su intervalo óptimo, se procede a la planeación de la operación en la cual se analizan las acciones que permiten ajustar los intervalos actuales al intervalo pulsante. Los cambios en los intervalos actuales pueden darse mediante los ajustes a:

- **Cambios en la velocidad.** Una mayor velocidad permitirá intervalos mas cortos a la vez de mantener el tamaño del parque vehicular.
- **Cambios en la longitud de la ruta.** con el fin de lograr mantener el



Fuente: Referencia [11].

Figura 5.25.
Concepto de pulso alterno y simultáneo en una red bifocal.



t_c = Tiempo de ciclo
 t_{cr} = Tiempo de ciclo (ruta radial)
 t_{cd} = Tiempo de ciclo (ruta directa)

Fuente: Referencia [11].

Figura 5.26.
 Operación de una red bifocal con $t_{cd} = t_{cr}$.

requerimiento de un STC de intervalos uniformes, se puede pensar en alargar o acortar la ruta.

- ***Cambios en el tamaño del parque vehicular.*** Generalmente, la implementación del intervalo pulsante en un STC requiere un mayor o menor número de unidades que los que actualmente se encuentran en operación en una ruta dada.

REFERENCIAS

1. Thor K. Haatveit. *Transit Operations Analysis*. Filadelfia: University of Pennsylvania, 1980.
2. Vukan R. Vuchic. *SEPTA Course*. Filadelfia: University of Pennsylvania, 1980.
3. A.W. Wardrop. *In Search of Standards of Service for Urban Public Transport*. Canberra. Department of Capital Territory, 1979.
4. Vukan R. Vuchic. *Transit Operating Manual*. Harrisburg: Pensylvania Department of Transportation, 1978.
5. Norbert Klein. *Stadtbahnsysteme und ihre Einsatzgrenzen*. Aachen: Schweers + Wall, 1978.
6. Rainer Lenk y Hans-Peter Theurich. *Beschleunigungsmassnahmen für Busse und Strassenbahnen*. Aachen: Schweers + Wall, 1980.
7. Herbert Felz y W. Grabe. *Neue Verkehrssysteme im Personennahverkehr*. Wiesbaden: se, 1974.
8. Fernando Labarga Tejada. *Peatonos: Circulación y Comportamiento, Conflictos con el Tráfico Rodado y sus Soluciones*. Madrid: Ag Grupo, SA, 1981.
9. AP Young y RW Cresswell. *The Urban Transport Future*. Londres: Construction Press, 1982.
10. SEDESOL. *Programa de Asistencia Técnica en Transporte Urbano para las Ciudades Medias Mexicanas. Operación del Transporte Público*. México: SEDESOL, 1994.
11. Vukan R. Vuchic, Angel Molinero y Richard Clarke. *Timed Transfer System: Planning, Design and Operation*. Washington, DC: UMTA, 1981.
12. Angel Molinero. *Transportation Services in Low Density Areas*. Filadelfia: University of Pennsylvania, 1980.
13. Vukan R. Vuchic. *Urban Public Transportation: Systems and Technology*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, Inc, 1981.
14. B. Sullivan. *The Timed Transfer Focal Point: A Refinement in Public Transport Service Design*. Bruselas: UITP Revue, 1976.

PREGUNTAS

1. Suponga que un corredor urbano está servido por una línea troncal y un cierto número de rutas radiales. Esta red puede ser servida por:

- una troncal con ramales (autobuses, tren ligero) o bien;
- por una troncal con alimentadoras

Si el sistema se opera como la primera opción y existe la propuesta de modificarlo para que opere como la segunda opción, enumere y explique las ventajas y desventajas que un cambio de esta naturaleza trae consigo.

2. Describa y analice la red de transporte público de su ciudad.
3. Al diseñar una red de transporte público, ¿cuáles son los aspectos que deberán cuidarse y cuáles son las características que deben tenerse presente?
4. ¿En qué forma el transportista puede incrementar su velocidad de operación? ¿Y su velocidad comercial?
- 5.Cuál es el papel primordial que desempeña el transporte público en áreas de baja densidad? ¿Cuáles son las dificultades a las que se enfrenta el transportista en estas áreas?