

CAPITULO VI

CAPACIDAD

GENERALIDADES

En la planeación, proyecto y operación de calles y carreteras, la demanda del tránsito, bien sea presente o futura, es considerada como una cantidad conocida. Una medida de la eficiencia con la que una calle o carretera presta servicio a esta demanda, es conocida como capacidad. Para determinar la capacidad se requiere no sólo de un conocimiento general de las características de la corriente de tránsito, sino también de un conocimiento de los volúmenes, bajo una variedad de condiciones físicas y de operación.

Asimismo, no puede tratarse la capacidad de un camino, sin hacer referencia a otras consideraciones importantes, tales como la calidad del nivel de servicio proporcionado y la duración del período de tiempo considerado, debido a que la capacidad es uno de tantos niveles de servicio al cual puede operar un camino.

El término "Nivel de Servicio" se usa para describir las condiciones de operación que un conductor experimentará durante su viaje por una calle o carretera, cuando los volúmenes están por abajo de la capacidad de un camino determinado. Como las condiciones físicas del camino están fijas, el nivel de servicio en una carretera varía principalmente con el volumen de tránsito.

Los elementos fundamentales que se consideran para evaluar el nivel de servicio bajo condiciones de flujo continuo, son la velocidad durante el recorrido y la relación volumen de demanda-capacidad o volumen de servicio-capacidad, en tanto que para intersecciones controladas con semáforos, el nivel de servicio es función del grado de utilización de las fases del semáforo.

Es importante señalar que la información y los criterios de análisis que se dan a este Capítulo, han sido tomados del Manual de Capacidad de Carreteras de los Estados Unidos⁵⁰ y reflejan, por lo tanto, condiciones típicas o promedio de las condiciones observadas en ese país.

Sin embargo, en aquellos casos en que se cuenta con información de estudios efectuados en nuestro medio, se han aprovechado incorporándolos en algunos de los procedimientos de análisis.

Los resultados favorables de estos estudios invitan a llevar a cabo más investigaciones, que indudablemente conducirán a proyectos más apropiados a nuestro medio y por consiguiente más económicos.

⁵⁰ *Highway Capacity Manual*; HRB; SR, 87; 1965.

6.1 DEFINICIONES

6.1.1 Capacidad

Capacidad de un camino, o de un carril, es el número máximo de vehículos que pueden circular por él durante un período de tiempo determinado y bajo condiciones prevalecientes, tanto del propio camino como de la operación del tránsito.

La capacidad, normalmente no puede ser excedida sin cambiar una o más de las condiciones prevalecientes. Al expresar la capacidad, es esencial plantear cuáles son las condiciones prevalecientes del camino y del tránsito.

6.1.2 Condiciones prevalecientes

La capacidad de un camino depende de un cierto número de condiciones: La composición del tránsito, los alineamientos horizontal y vertical, y el número y ancho de los carriles, son unas cuantas de estas condiciones que, en conjunto, pueden designarse como condiciones prevalecientes.

Las condiciones prevalecientes pueden dividirse en dos grupos generales: 1) condiciones establecidas por las características físicas del camino y 2) condiciones que dependen de la naturaleza del tránsito en el camino.

Las condiciones prevalecientes del camino no pueden ser cambiadas, a menos que se lleve a cabo una reconstrucción del camino. Las condiciones prevalecientes del tránsito pueden cambiar o ser cambiadas de hora en hora, o durante varios periodos del día.

Además de las condiciones del camino y del tránsito están las condiciones ambientales, como son el frío, el calor, la lluvia, la nieve, los vientos, la niebla, la visibilidad, etc., condiciones que afectan la capacidad de un camino; sin embargo, debido a que los datos disponibles son limitados, la cuantificación de su efecto en la capacidad no será discutida en este capítulo.

6.1.3 Nivel de servicio

Nivel de Servicio es un término que denota un número de condiciones de operación diferentes que pueden ocurrir en un carril o camino dado, cuando aloja varios volúmenes de tránsito. Es una medida cualitativa del efecto de una serie de factores, entre los cuales se pueden citar: la velocidad, el tiempo de recorrido, las interrupciones del tránsito, la libertad de manejo, la seguridad, la comodidad y los costos de operación.

Un determinado carril o camino puede proporcionar un rango muy amplio de niveles de servicio. Los diferentes niveles de servicio de un camino específico son función del volumen y composición del tránsito, así como de las velocidades que pueden alcanzarse en ese camino.

Un carril o camino proyectado para un determinado nivel de servicio, en realidad operará a muchos niveles, conforme varía el volumen durante una hora o durante diferentes horas del día, durante días de la semana, o durante periodos del año, y aun durante diferentes años, con el crecimiento del tránsito.

6.1.4 Volumen de servicio

A cada nivel de servicio le corresponde un volumen de tránsito, al cual se le llama Volumen de Servicio para ese nivel. Por lo tanto, puede definir-

se el volumen de servicio, como el máximo número de vehículos que pueden circular por un camino durante un periodo de tiempo determinado, bajo las condiciones de operación correspondientes a un seleccionado nivel de servicio. El volumen de servicio máximo equivale a la capacidad, y lo mismo que ésta, los volúmenes de servicio se expresan normalmente como volúmenes horarios.

6.1.5 Caminos según su función

A) Control total de accesos. Significa que se le da preferencia al tránsito de paso, y que sólo existen conexiones con otros caminos en puntos seleccionados de la autopista, prohibiéndose además, las intersecciones a nivel y los accesos directos a propiedades privadas.

B) Control parcial de accesos. Significa que se le da preferencia al tránsito de paso, y que además de las conexiones con otros caminos en puntos específicos, pueden existir algunas intersecciones a nivel y accesos directos a propiedades privadas.

C) Camino dividido. Camino con circulación en dos sentidos, en el cual el tránsito que circula en un sentido es separado del tránsito que circula en sentido opuesto, por medio de una faja separadora central. Tales caminos pueden estar constituidos por dos o más carriles en cada sentido.

D) Camino no dividido. Camino sin faja separadora central, que separe los movimientos en sentido opuesto.

E) Arteria urbana. Camino principal en zona urbana, para el tránsito de paso, generalmente sobre una ruta continua.

F) Camino de dos carriles. Camino no dividido, con circulación en ambos sentidos, que tiene un carril destinado a cada sentido de circulación.

G) Camino de tres carriles. Camino no dividido, con circulación en ambos sentidos, que tiene un carril central destinado para maniobras de rebáse, en el cual se puede circular en los dos sentidos y los otros dos carriles están destinados cada uno, para el uso exclusivo del tránsito que circula en sentidos opuestos.

H) Camino de carriles múltiples. Camino no dividido, con circulación en ambos sentidos, que tiene cuatro o más carriles para el tránsito.

I) Vía rápida. Camino dividido destinado al tránsito de paso, con control total o parcial de accesos y generalmente con pasos a desnivel en intersecciones importantes.

J) Autopista. Vía rápida con control total de accesos.

6.1.6 Caminos según la configuración del terreno

El término, tal como se usa en este capítulo, se refiere en general a caminos que se construyen en tres tipos de terrenos, a saber: plano, lomerío y montañoso. Estos tres tipos representan combinaciones de características geométricas en grado variable, que se refieren principalmente a las pendientes y a la sección transversal. Reflejan el efecto sobre la capacidad de las características de operación de los vehículos pesados, en relación con las características de operación de los vehículos ligeros, bajo las diferentes condiciones geométricas.

A) Camino en terreno plano. Se refiere a cualquier combinación de los alineamientos horizontal y vertical, que permita a los vehículos pesados mantener una velocidad semejante a la de los vehículos ligeros.

B) Camino en terreno de lomerío. Se refiere a cualquier combinación de los alineamientos horizontal y vertical, que obligan a los vehículos pesados a reducir su velocidad debajo de la de los vehículos ligeros, en algunos tramos de la carretera.

C) Camino en terreno montañoso. Se refiere a cualquier combinación de los alineamientos horizontal y vertical, que obliga a los vehículos pesados a operar con velocidades muy bajas, en distancias considerables y a intervalos frecuentes.

6.1.7 Conceptos relacionados con el tránsito

A) Factor de carga. Es la relación del número total de intervalos con luz verde del semáforo que se utilizan completamente por el tránsito durante la hora de circulación máxima, al número total de intervalos verdes para ese acceso durante el mismo período de tiempo. El valor máximo que puede alcanzar es uno.

B) Factor de la hora de máxima demanda. Es la relación entre el volumen registrado en la hora de máxima demanda y el valor máximo de la circulación durante un período de tiempo dado dentro de dicha hora, multiplicado por el número de veces que ese período cabe en una hora. Es una medida de las características del tránsito durante los períodos máximos; el valor más alto de esta relación es uno. El término así descrito debe limitarse para un período corto dentro de la hora, considerándose generalmente de cinco o seis minutos en las autopistas y de 15 minutos en las intersecciones.

C) Circulación continua. Es la condición del tránsito por la cual un vehículo que recorra un tramo de un camino, no se ve obligado a detenerse por cualquier causa externa a la corriente de tránsito, si bien, dicho vehículo puede verse obligado a detenerse por causas propias de la corriente del tránsito por la que circula.

D) Circulación discontinua. Es la condición del tránsito por la cual un vehículo que recorra un tramo de camino, se ve obligado a detenerse por causas que no sean propias de la corriente del tránsito, tales como señales o semáforos en una intersección. Las paradas de vehículos causadas por obstáculos e interferencias dentro de la corriente de tránsito no se consideran como circulación discontinua.

6.2 OBJETO DE LA CAPACIDAD

El conocimiento de la capacidad o del volumen de servicio de un camino sirve fundamentalmente a dos propósitos.

A) Para fines de proyecto de una obra nueva. El análisis de capacidad o nivel de servicio influye directamente en la determinación de las características geométricas de un camino; estas características dependerán por una parte del volumen horario de proyecto que se considere en el análisis. Las características geométricas elegidas deberán suministrar un volumen de servicio correspondiente al nivel de servicio establecido, por lo menos igual al volumen horario de proyecto.

Por regla general, al proyectar un camino nuevo no conviene fijar condiciones de operación a un nivel de servicio igual a la capacidad, ya que esto equivale a tener condiciones de operación desfavorables desde su apertura al tránsito. Es recomendable para fines de proyecto, establecer un nivel de servicio aceptable para los conductores. La selección que se haga del nivel de servicio depende de varios factores, siendo los principales las limitaciones físicas y económicas, así como el grado de seguridad que se desee.

B) Para la investigación de las condiciones de operación de un camino existente. El análisis comparativo entre el volumen de tránsito que circula por un camino existente y el volumen de servicio del mismo, de acuerdo con sus características geométricas y del tránsito, permite determinar el nivel de servicio a que está operando y la fecha probable en que quedará saturado.

El conocimiento de los niveles de servicio actuales y futuros de un grupo o de una red de caminos, permite por otra parte, establecer una jerarquía de necesidades viales que sirva como índice para determinar prioridades.

6.3 CARACTERISTICAS DEL TRANSITO

Siendo la capacidad de un camino función de sus características físicas y de las características de la operación del tránsito que circula por él, es importante conocer las características operacionales, las cuales comprenden volúmenes de tránsito, tendencias y variaciones en la velocidad, y la interdependencia entre velocidades, volúmenes y espaciamiento vehicular en relación con su efecto en la capacidad.

6.3.1 Características del volumen

A) Máximos volúmenes observados. Los volúmenes horarios máximos observados en un grupo seleccionado de caminos de los Estados Unidos de América durante el año de 1961, fueron los siguientes:

Carreteras rurales de dos carriles (ambos sentidos)	1 870 vph
Arterias urbanas de dos carriles (ambos sentidos)	2 060 vph
Carreteras rurales de cuatro carriles (un sentido)	1 775 vph/carril
Vías rápidas urbanas de cuatro carriles (un sentido)	2 235 vph/carril
Autopistas rurales de cuatro carriles (un sentido)	1 685 vph/carril
Autopistas urbanas de cuatro carriles (un sentido)	2 030 vph/carril

Los valores anteriores son volúmenes máximos registrados en caminos de características particulares, y por lo tanto, es posible que puedan ocurrir volúmenes mayores en otros caminos.

B) Distribución por sentidos. Se ha observado que el tránsito promedio diario anual es aproximadamente el mismo en cada sentido en un camino de dos carriles. Sin embargo, los volúmenes horarios pueden variar ampliamente. Un flujo por sentidos no balanceado tiene un efecto crítico en el cálculo de la capacidad de carreteras de carriles múltiples; de aquí que sea de primordial importancia conocer la distribución por sentidos, especialmente durante los períodos de máxima demanda.

C) Distribución por carriles. En un camino de un solo sentido de circulación con dos o más carriles, generalmente ocurren fluctuaciones muy amplias en el número de vehículos que utilizan cada carril. En la Figura 6.1 se ilustra el efecto que el volumen de tránsito tiene sobre la utilización de los carriles en una carretera de seis carriles, con tres en cada dirección. El carril número uno es el exterior, o sea el que queda junto al acotamiento; el dos es el de en medio y el tres es el adyacente a la faja separadora central.

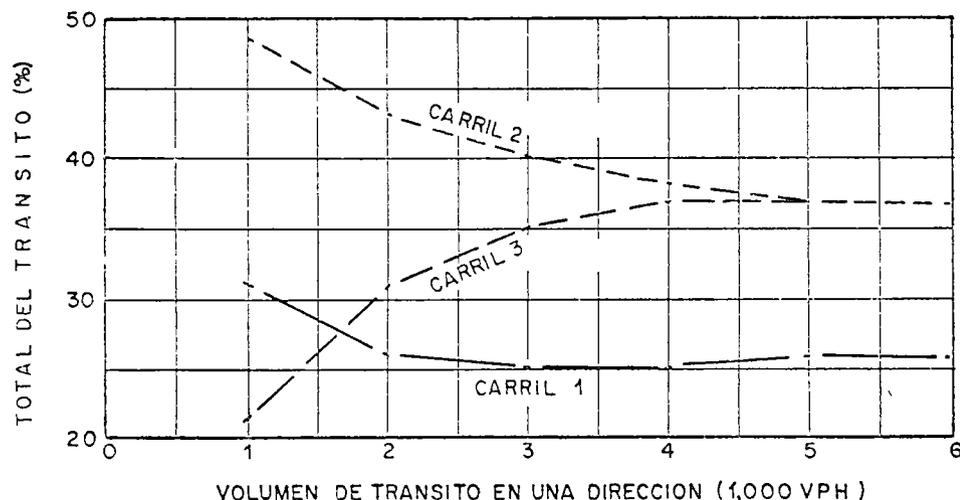


FIGURA 6.1. EFECTO DEL VOLUMEN DE TRANSITO EN LA UTILIZACION DE CARRILES, EN CARRETERAS DE SEIS CARRILES

D) Composición del tránsito. El porcentaje de camiones y autobuses en una corriente de tránsito afecta las velocidades de los vehículos y las características de operación, especialmente en zonas de topografía abrupta que imponga restricciones físicas, tales como carriles angostos y pendientes pronunciadas. La Figura 6.2 ilustra la fluctuación horaria de la composición del tránsito, expresada en por ciento de vehículos pesados, en carreteras rurales y urbanas.

E) Fluctuaciones del tránsito en el tiempo. Fluctuación mensual. Las variaciones mensuales de los volúmenes de tránsito están estrechamente relacionadas con las actividades y demandas sociales y económicas de la zona por la que atraviesa el camino. Por ejemplo, habrá zonas en las que los volúmenes sean mayores durante los meses de verano, correspondientes a la época de vacaciones. La Figura 6.3-A ilustra algunos casos de variaciones mensuales del tránsito.

Fluctuación semanal. La Figura 6.3-B ilustra las variaciones características durante la semana en carreteras, comerciales y turísticas. Generalmente, en carreteras comerciales el tránsito permanece casi uniforme entre semana, en tanto que en carreteras turísticas por lo común, los domingos es el día de mayor demanda de tránsito.

Fluctuación diaria. Las fluctuaciones diarias varían ampliamente de un camino a otro, y aun en un mismo camino. En general, en zonas urbanas

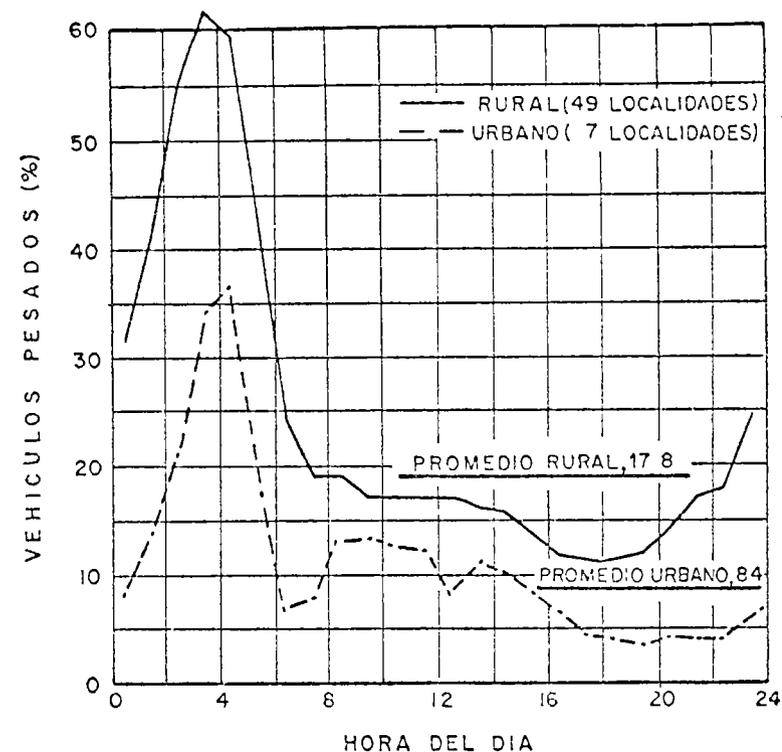
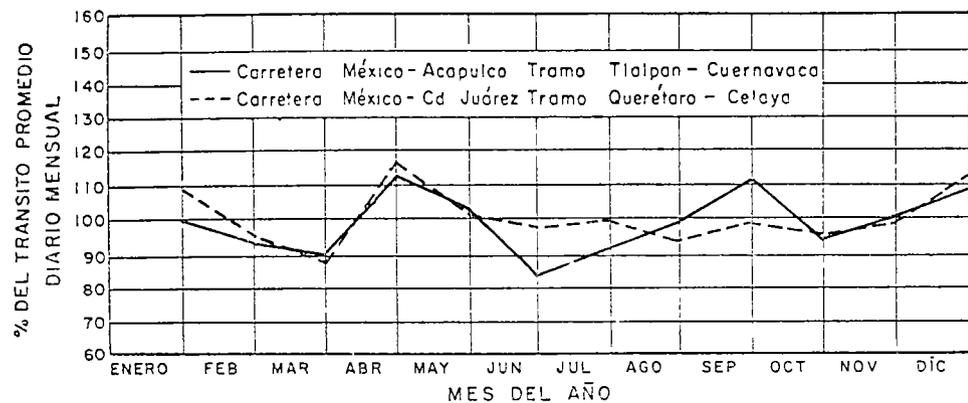


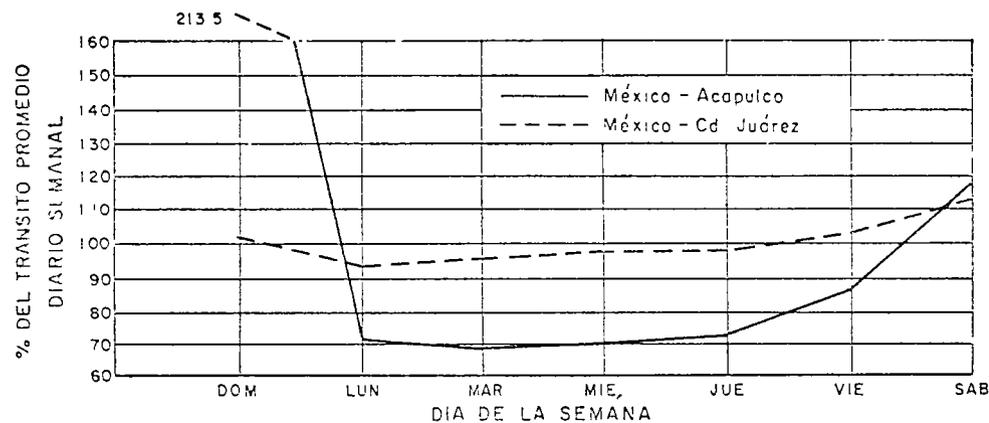
FIGURA 6.2. VARIACION DEL POR CIENTO DE VEHICULOS PESADOS DURANTE LAS HORAS DEL DIA

el tránsito está caracterizado por dos máximos, uno en la mañana y otro en la tarde, en tanto que en zonas rurales generalmente se presenta un solo máximo en la tarde. En la Figura 6.3-C se ilustran las fluctuaciones del tránsito en varios casos característicos.

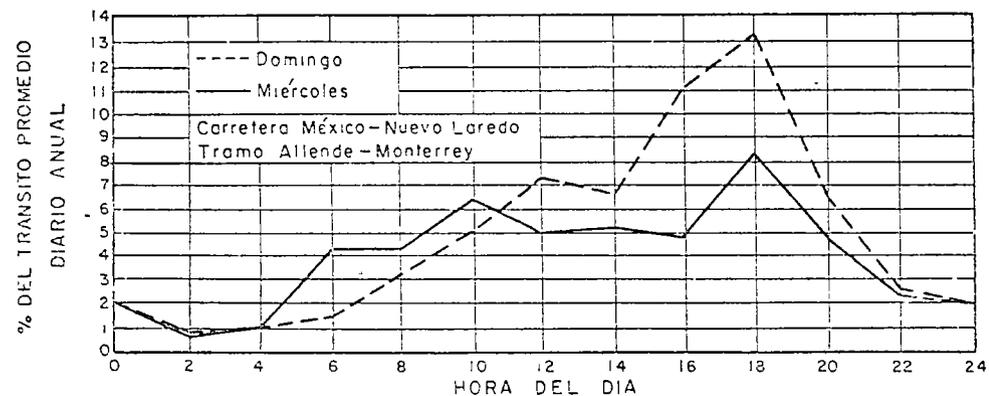
Fluctuación horaria (características de la demanda máxima). Aunque para fines de planeación y proyecto se utilizan normalmente volúmenes horarios, la habilidad de un camino para acomodar satisfactoriamente un volumen horario depende principalmente de la magnitud y secuencia de las fluctuaciones en cortos periodos de tiempo. El volumen en la hora de máxima demanda no necesariamente implica que se mantenga la misma proporción del flujo durante toda la hora. Por el contrario, se sabe por experiencia, que a menudo es muy variable. La relación entre el volumen que ocurre durante la hora de máxima demanda y la máxima proporción del flujo durante un período de tiempo dado dentro de dicha hora, se llama factor de la hora de máxima demanda. Este factor constituye una medida de las características del tránsito durante los periodos máximos, y el valor más alto que alcanza es uno. Los periodos de tiempo dentro de la hora de máxima demanda que se han considerado más adecuados para establecer esta relación, son: 5 minutos para autopistas y 15 minutos para intersec-



A) Variación mensual



B) Variación semanal



C) Variación horaria

FIGURA 6.3. VARIACIONES DEL VOLUMEN DE TRANSITO

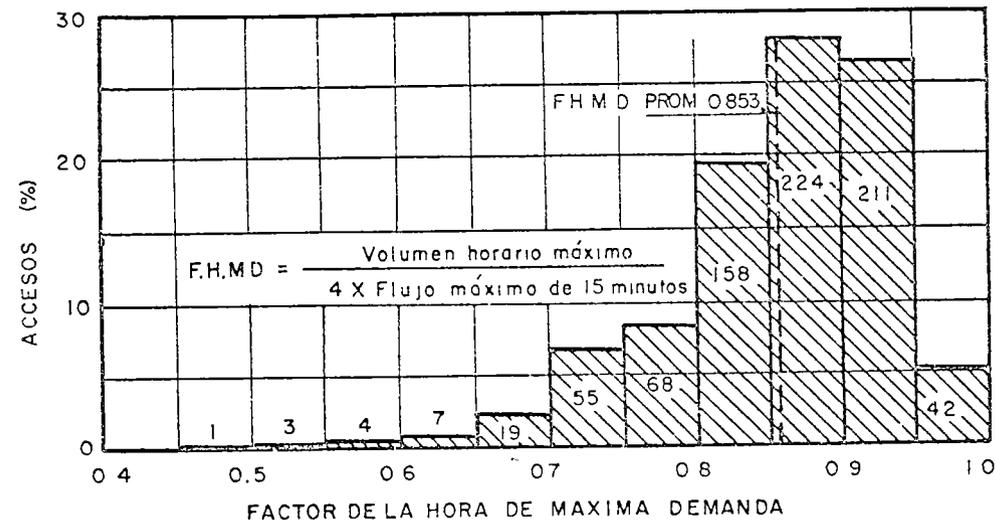


FIGURA 6.4. FACTOR DE LA HORA DE MAXIMA DEMANDA CONSIDERANDO PERIODOS DE FLUJO MAXIMO DE 15 MINUTOS EN 792 ACCESOS DE INTERSECCIONES URBANAS

ciones. En la Figura 6.4 se muestran los factores de la hora de máxima demanda observados en un grupo numeroso de intersecciones con semáforo, en tanto que la Figura 6.5 muestra la relación entre el volumen en la hora de máxima demanda y la máxima proporción de flujo en los intervalos de 5 minutos, en autopistas urbanas. Los resultados se han correlacionado con la población, y están basados, como en el caso anterior, en observaciones efectuadas en numerosos caminos en zonas urbanas.

F) Relación entre los volúmenes horarios de proyecto, y el tránsito promedio diario anual.

Intimamente relacionado con las fluctuaciones en el flujo del tránsito, está la selección del volumen horario que deberá usarse para fines de proyecto.

Los volúmenes de tránsito horario en un camino muestran una amplia distribución durante el año y por regla general, la mayor parte del tránsito ocurre durante un número pequeño de horas. Proyectar un camino para un volumen horario medio sería inadecuado, puesto que durante la mayor parte de las horas del año su capacidad sería insuficiente. Proyectarlo para el volumen horario máximo significaría que su capacidad estaría excedida durante todas las horas del año excepto una, lo cual no es aceptable económicamente. El volumen horario que se seleccione debe ser un valor intermedio, basado en un análisis comparativo entre el servicio que desea proporcionarse y el costo.

Una guía para determinar el tránsito horario que deba utilizarse para fines de proyecto, es una curva que muestra la variación de volúmenes de tránsito horario durante el año.

En la Figura 6.6 se muestran tres curvas que representan los límites dentro de los cuales quedan comprendidas las relaciones entre los volúmenes

VOLUMEN HORARIO (V H) = 12 VECES EL VOLUMEN DE LOS CINCO MINUTOS MAS ALTOS

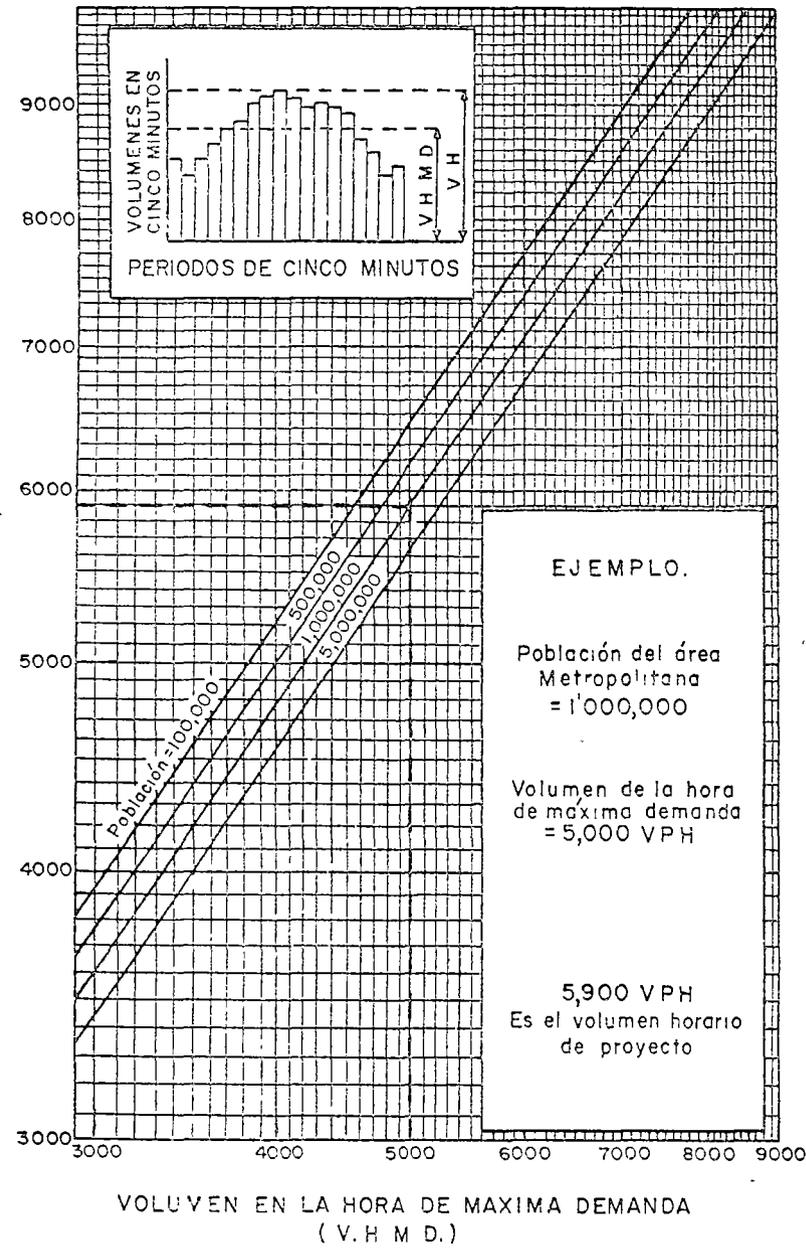


FIGURA 6.5. DETERMINACION DE LA PROPORCION DE FLUJO PARA LOS INTERVALOS MAS ALTOS DE CINCO MINUTOS, TOMANDO COMO BASE EL VOLUMEN HORARIO MAXIMO

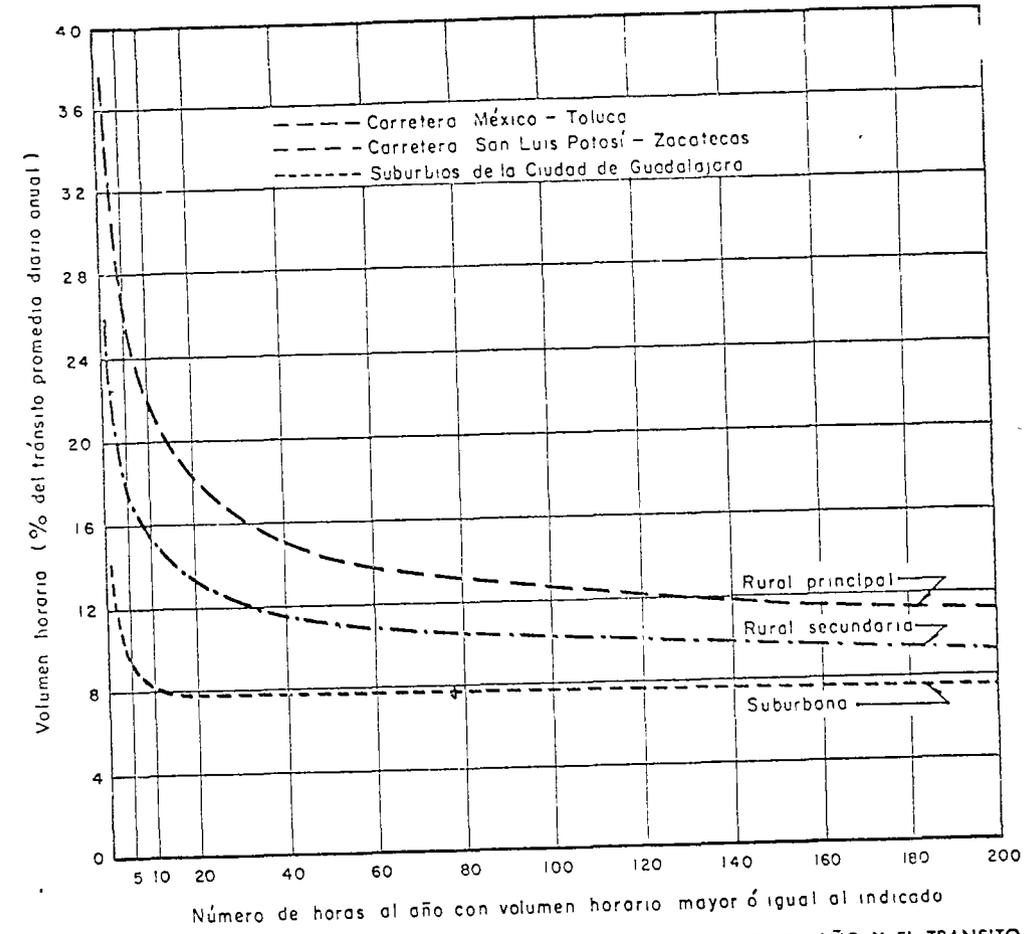


FIGURA 6.6. RELACIONES ENTRE LOS VOLUMENES HORARIOS MAS ALTOS DEL AÑO Y EL TRANSITO PROMEDIO DIARIO ANUAL

horarios más altos del año y el tránsito promedio diario anual de las carreteras nacionales. En ella se aprecia que la curva superior es característica de los caminos rurales principales, en cambio la curva inferior es representativa de caminos suburbanos, dado que los volúmenes horarios se mantienen constantes durante todo el año.

De estas curvas se ha sacado en conclusión, que el volumen horario para fines de proyecto está comprendido entre el 8% y el 16% del tránsito promedio diario anual. Sin embargo, la elección de un volumen horario de proyecto específico dependerá de consideraciones económicas, al hacer el balance entre beneficios y costos de construcción.

6.3.2 Características de la velocidad

La estimación que un conductor hace de la calidad de un camino depende en gran parte de la velocidad a la cual puede operar. La mayor

parte de los conductores aceptan velocidades menores en zonas urbanas que en zonas rurales.

A) Tendencias de la velocidad. Aun cuando las velocidades en los caminos se ven afectadas por elementos, tales como el volumen, la capacidad, el estado de tiempo o por los dispositivos para el control del tránsito, en condiciones de bajos volúmenes, donde los conductores pueden circular a la velocidad deseada, las velocidades en general se han incrementado a través del tiempo. Sin embargo, este incremento tiene un límite, ya que conforme aumenta el volumen de tránsito, la velocidad tiende a mantenerse constante dentro de un cierto rango, que es más pequeño en cuanto el camino se aproxima a su capacidad. Por otra parte, es importante señalar que la capacidad que puede suministrar un camino permanece constante con el tiempo. Entonces, para un determinado volumen de tránsito, existe un número de horas en que se alcanza esta capacidad; si el volumen aumenta, el número de estas horas también se incrementa. Bajo estas condiciones, habrá más horas en que los conductores no podrán circular a la velocidad deseada y la velocidad media en el camino tenderá a decrecer.

B) Variaciones diarias de la velocidad. Las observaciones efectuadas han mostrado que la velocidad disminuye conforme aumentan los volúmenes de tránsito, especialmente en las horas de máxima demanda. También se ha observado que la fluctuación de la velocidad durante el día es mayor que durante la noche, si bien las velocidades medias en ambos períodos son aproximadamente iguales.

C) Velocidad media por carriles. En general, prescindiendo del volumen de tránsito, las velocidades más altas se producen en los carriles interiores de caminos de cuatro o más carriles, y las velocidades más bajas, en los carriles exteriores. Las diferencias más grandes de la velocidad entre carriles, se producen bajo condiciones de bajo volumen de tránsito, disminuyendo esta diferencia conforme el volumen aumenta.

D) Fluctuaciones de la velocidad. En la mayoría de los casos, las velocidades de cada vehículo en particular fluctúan alrededor de la velocidad media. Esto es, la mayoría de los conductores circulan a velocidades uniformemente distribuidas, dentro de un cierto rango de valores. La proporción de las velocidades que exceden este rango es la misma que la de las velocidades que quedan bajo él. La Figura 6.7 muestra las curvas características de la distribución de las velocidades, en caminos rurales de dos carriles. Estas curvas son generalizaciones para condiciones relativamente ideales y están basadas en una serie de investigaciones recientes. Cada curva corresponde a un volumen de tránsito. Puede observarse que para los más altos volúmenes de tránsito, la fluctuación de las velocidades es relativamente pequeña, y que esta fluctuación aumenta conforme disminuyen los volúmenes de tránsito.

6.3.3 Características del espaciamiento y de los intervalos entre vehículos

A) Relaciones matemáticas. Espaciamiento, es la distancia entre frente y frente de vehículos sucesivos. Intervalo, es el tiempo que transcurre entre el paso de dos vehículos sucesivos por un punto dado, medido entre frente y frente de vehículos. Así, un kilómetro de camino incluye espacia-

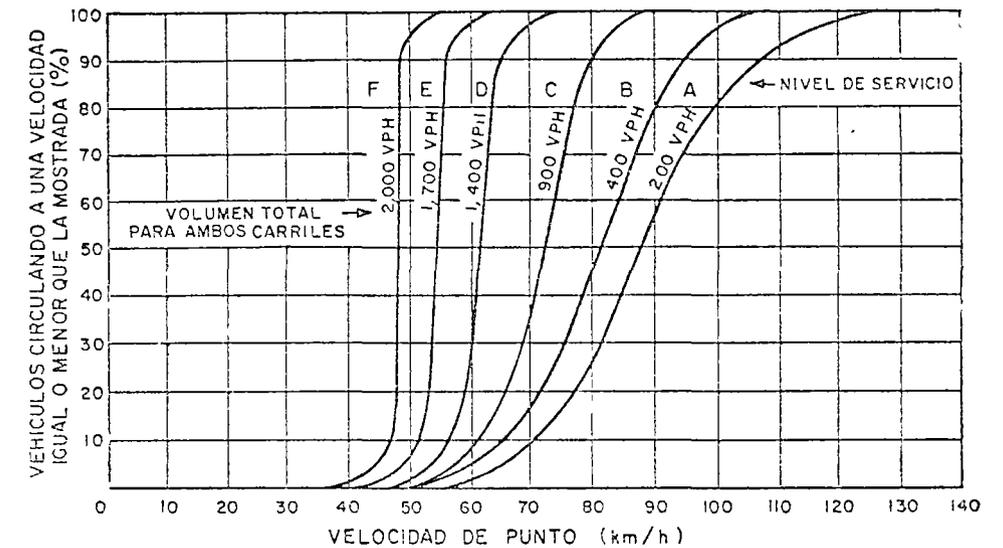


FIGURA 6.7. DISTRIBUCION DE VELOCIDADES DE VEHICULOS LIGEROS, EN CARRETERAS DE DOS CARRILES, CON DOS SENTIDOS DE CIRCULACION

mientos cuya suma total es un kilómetro, y una hora de flujo de tránsito incluye intervalos que totalizan una hora. La relación entre espaciamiento e intervalo depende de la velocidad y está dada por la siguiente expresión:

$$\text{Intervalo (seg.)} = \frac{\text{Espaciamiento (m)}}{\text{Velocidad (m/seg)}}$$

Esta ecuación es válida para pares individuales de vehículos o para corrientes de tránsito que operan en forma constante, pero llega a ser mucho más compleja cuando las velocidades vehiculares varían considerablemente.

Existe además una relación entre el espaciamiento y el número de vehículos que ocupan una unidad de longitud en un instante dado. A este número de vehículos se le llama densidad, y generalmente se expresa en vehículos por kilómetro. Su relación con el espaciamiento medio está dada por la siguiente expresión:

$$\text{Densidad (veh/km)} = \frac{1\,000 \text{ (m/km)}}{\text{espaciamiento medio (m/veh)}}$$

Análogamente, puede expresarse una relación similar entre el intervalo medio y el volumen de tránsito, en la siguiente forma:

$$\text{Volumen (vph)} = \frac{3\,600 \text{ (seg/h)}}{\text{Intervalo medio (seg/veh)}}$$

B) El espaciamiento como una medida de la capacidad. Aunque el volumen puede ser la medida más significativa de la demanda del tránsito, el espaciamiento y el intervalo entre vehículos afectan al usuario en

un grado mayor, y por lo tanto, están relacionados más directamente con el nivel de servicio. El espaciamiento y el intervalo le dan al conductor que viaja dentro de una corriente de tránsito, una indicación de la fluidez o de la congestión del mismo, afectando continuamente la velocidad y posición de su vehículo. Debido a esto, las reacciones de los conductores bajo diversas condiciones, tienen un efecto considerable en la capacidad del camino. Fundamentalmente, el volumen de tránsito varía directamente con la velocidad, e inversamente con el espaciamiento entre vehículos. Por lo tanto, esta relación puede expresarse en la forma siguiente, considerando, por simplicidad, un solo carril de tránsito:

$$\text{Volumen (vph)} = \frac{1\,000 \text{ (m/km)} \times \text{velocidad (km/h)}}{\text{espaciamiento (m/veh)}}$$

Utilizando esta relación, muchos de los primeros investigadores determinaron la capacidad máxima de un carril de tránsito, suponiendo ciertos espaciamientos mínimos a diferentes velocidades. En algunos casos, los espaciamientos mínimos fueron calculados utilizando factores tales como tiempo de reacción del conductor, distancias de frenado y coeficientes de fricción. En otros casos, el espaciamiento mínimo, como una función de la velocidad, fue obtenido por observaciones directas.

C) Distribución de los intervalos y flujo al azar. Si todos los vehículos que utilizan un camino circularan a la misma separación, sería fácil determinar el volumen máximo o el nivel de congestionamiento. Sin embargo, los vehículos no circulan a intervalos uniformes, más bien tienden a formar grupos, aun a bajos volúmenes de tránsito, existiendo para cada volumen de tránsito un intervalo medio. No obstante, los intervalos muestran una gran variación, con muchos vehículos circulando a intervalos cortos, y otros circulando con intervalos relativamente grandes.

La Figura 6.8 muestra la distribución de espaciamiento entre vehículos sucesivos viajando en el mismo sentido en caminos rurales de dos y de cuatro carriles, para diversos volúmenes de tránsito bajo condiciones de flujo continuo. Casi para cualquier volumen, aproximadamente dos tercios de los vehículos circulan a intervalos iguales o menores que el intervalo medio. En la Figura 6.8-A por ejemplo, puede verse que para un volumen horario de 600 vehículos (o un intervalo medio de 6 seg/veh),⁵¹ aproximadamente 450 vehículos⁵² estarán espaciados 6 segundos o menos, del vehículo que le precede.

También puede hacerse una descripción de las características del espaciamiento vehicular, en términos matemáticos. Bajo ciertas condiciones, el espaciamiento vehicular o la proporción de paso de los vehículos por un punto, sigue una distribución casual o al azar; esto es, la posición de cada vehículo es independiente de cualquier otro, y tramos iguales de camino tienen la misma probabilidad de alojar el mismo número de vehículos. Esta distribución está dada por la distribución de Poisson:

$$p(x) = \frac{e^{-m} m^x}{x!}$$

⁵¹ Int (seg/veh) = $\frac{3\,600 \text{ (seg/h)}}{\text{Volumen (vph)}}$

⁵² 75% × 600 vph = 450 vph.

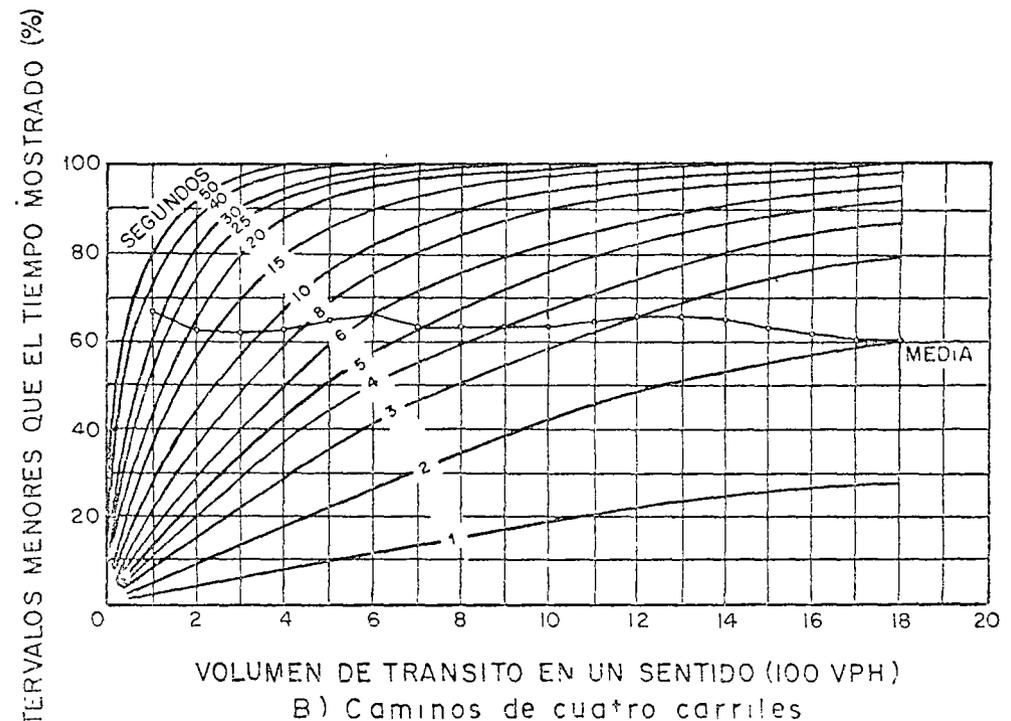
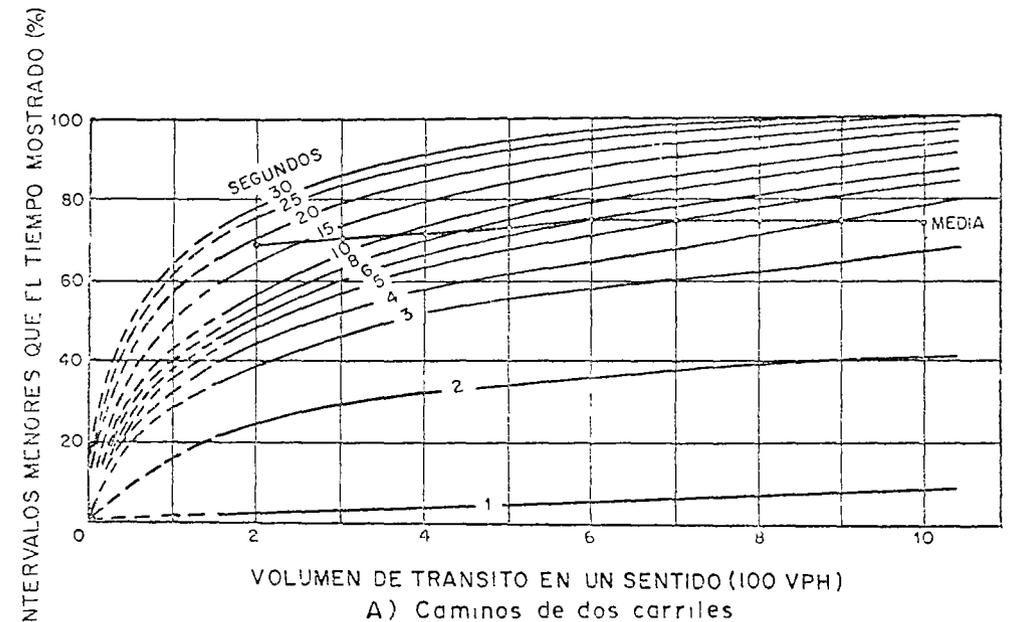


FIGURA 6.8 DISTRIBUCION DE LA FRECUENCIA DE INTERVALOS ENTRE PARES DE VEHICULOS CIRCULANDO EN EL MISMO SENTIDO A DIFERENTES VOLUMENES DE TRANSITO EN CAMINOS RURALES

en la cual:

$P(x)$ = Probabilidad de exactamente (x) ocurrencias.

x = Número de ocurrencias.

e = Base de los logaritmos Neperianos = 2.7183.

m = Promedio de ocurrencias que se espera.

La distribución de Poisson es de mayor utilidad cuando se trate de la distribución de eventos discretos, como lo es el arribo de vehículos dentro de un intervalo dado. La distribución de intervalos de tiempo entre vehículos es una variable continua y exponencial por naturaleza. Esta distribución exponencial, derivada de Poisson para la condición de no arribo de vehículos durante un periodo de tiempo dado, está dada por:

$$P(h > t) = e^{-qt}$$

en la cual:

$P(h > t)$ = Probabilidad de un intervalo igual o mayor que el tiempo t .

h = Intervalo de tiempo entre vehículos.

t = Tiempo de segundos.

q = Flujo en vehículos por segundo.

La distribución de las separaciones obtenidas de esta ecuación tiene varias aplicaciones. Una de ellas es comparar la distribución de las separaciones calculadas y las observadas para varios volúmenes de tránsito. Una desviación apreciable de la distribución al azar o un gran porcentaje de vehículos circulando con separaciones restringidas, sería un índice del congestionamiento que experimente la corriente del tránsito.

Otra aplicación consiste en estimar el número y longitud de los claros en una corriente de tránsito en rampas de acceso e intersecciones a nivel. Desde un punto de vista práctico, la justificación para adoptar normas de proyecto o medidas para el control del tránsito, deben basarse en la forma en que funcionará el camino para diferentes volúmenes de tránsito. Cuando un conductor desea cruzar una corriente de tránsito desde la condición de alto, lo hará cuando le parezca adecuado un claro o espacio entre vehículos de la corriente del tránsito principal. La Figura 6.9 muestra los diagramas preparados para un estudio en un camino rural de cuatro carriles. Estos diagramas dan, para varios intervalos, el tiempo probable de espera para diversos volúmenes de tránsito. El diagrama A) es para una probabilidad de 95%, y el B), para una probabilidad de 50%.

D) Efecto de las interrupciones del tránsito en los intervalos. Obviamente, cuando ocurre una interrupción del tránsito, como por ejemplo en una intersección controlada con semáforos, la circulación al azar deja de existir, y es reemplazada por un efecto de agrupamiento. Conforme el grupo se aleja del punto de interrupción los vehículos tienden a separarse, tanto en tiempo como en distancia. Si no vuelve a presentarse ninguna interrupción, a cierta distancia los intervalos vuelven a ser casuales.

El conocimiento del efecto de las interrupciones del tránsito en los intervalos es necesario al evaluar muchos problemas de tránsito. Por una parte, la presencia de semáforos afecta la distribución de claros o separaciones para vehículos o peatones que desean entrar o cruzar una co-

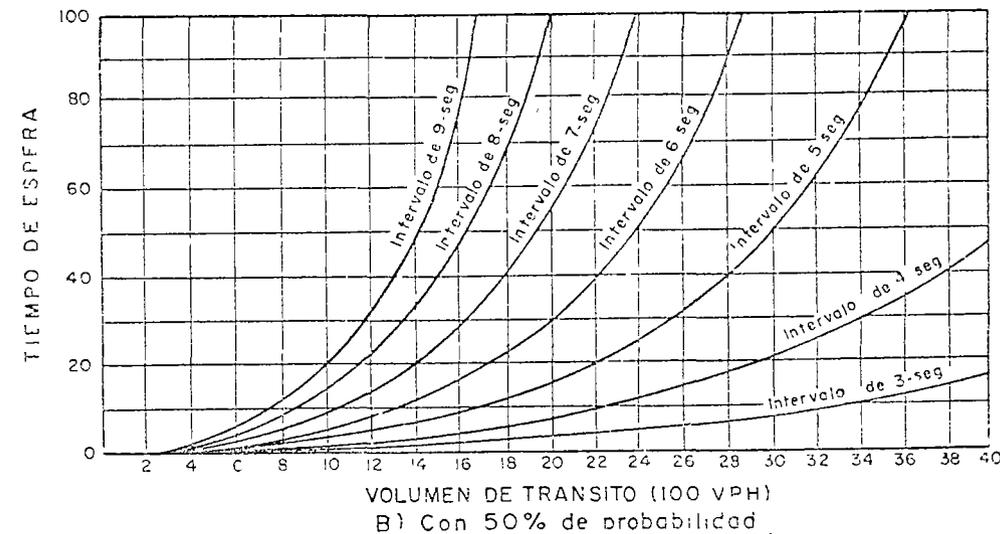
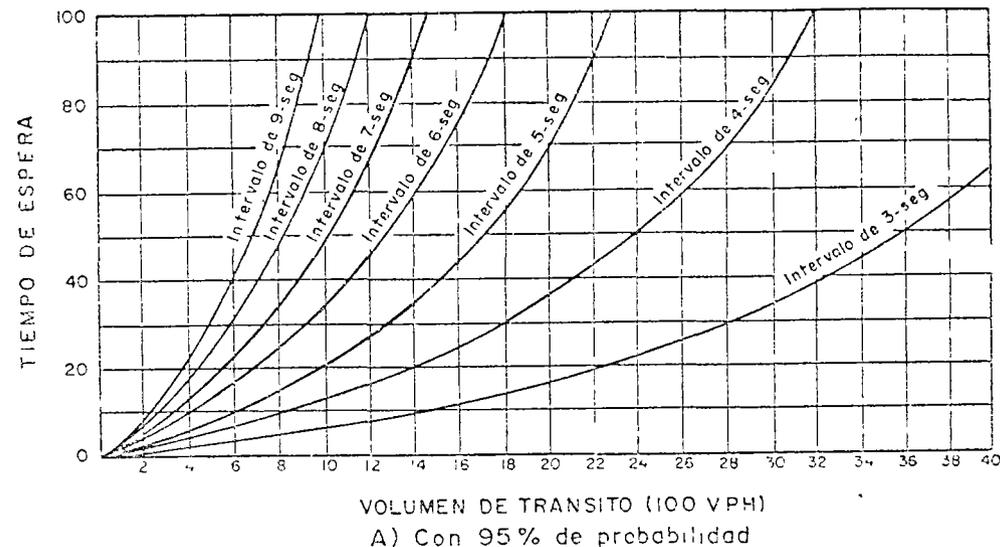


FIGURA 6.9. TIEMPO DE ESPERA PARA INTERVALOS ELEGIDOS A DIFERENTES VOLUMENES

riente de tránsito. Por otra parte, la retención de grupos de vehículos es deseable en un sistema de semáforos progresivos. Los sitios y las condiciones de aplicación son demasiado diferentes para permitir establecer criterios específicos, ya que los vehículos que entran o salen de la corriente de tránsito en un tramo, o que operan erráticamente dentro del mismo, crean variantes del patrón normal.

6.3.4 Relaciones entre velocidad, volumen y densidad

Los estudios teóricos efectuados hasta la fecha han mostrado que los principios y leyes de la física y de la hidráulica, pueden aplicarse a la circulación del tránsito. Una combinación de los estudios teóricos y las observaciones directas parecen dar la mejor aproximación total.

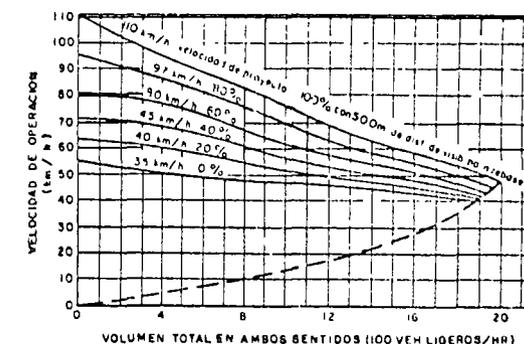
A) Relación velocidad-volumen. La relación fundamental velocidad-volumen puede expresarse como sigue: Conforme el volumen del tránsito aumenta, la velocidad media de los vehículos disminuye. Los estudios de campo han mostrado que una línea recta representa razonablemente la relación velocidad-volumen en el rango de cero, hasta la densidad crítica, para condiciones de flujo continuo. Estas investigaciones también indican que para autopistas y vías rápidas, la relación velocidad-volumen es algo curva. En el punto crítico donde se alcanza la capacidad, es decir, cuando el volumen de tránsito se aproxima a 2 000 vph por carril a una velocidad aproximada de 50 km/h, la curva representativa de la relación alcanza un máximo y entonces se regresa para entrar en la región de circulación forzada. Las Figuras 6.10-A, 6.10-B y 6.10-C muestran la relación característica entre la velocidad de operación y el volumen bajo condiciones ideales de circulación continua en caminos de dos carriles, en caminos de carriles múltiples y en autopistas, respectivamente.

La parte superior de cada curva muestra la relación velocidad-volumen hasta el punto de densidad crítica. Más allá de este punto, un pequeño incremento en el volumen causa una rápida disminución de la velocidad. La zona sombreada en el extremo derecho de los diagramas, representa condiciones de operación altamente inestable.

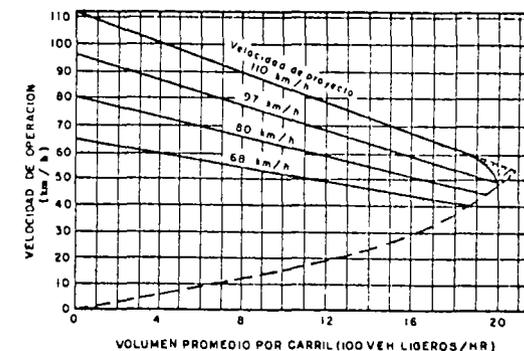
Estos diagramas son únicamente ilustrativos y no sirven para resolver problemas reales, debido a que no toman en cuenta los ajustes por las influencias adversas que generalmente se encuentran en la práctica.

Flujo discontinuo. La relación velocidad-volumen es difícil de establecer bajo condiciones de flujo discontinuo. En la mayor parte de los casos más comunes, como son las calles de una ciudad con intersecciones controladas con semáforos, tanto la demanda como la capacidad, a menudo son diferentes en tramos adyacentes. Además, la máxima velocidad está determinada frecuentemente por influencias externas, tales como la sincronización de los semáforos y los límites de velocidad, más bien que por los deseos del conductor. Así, la mayor parte de los estudios de las características del flujo discontinuo han tratado con tramos relativamente cortos, y han expresado la relación indirectamente en términos de "demora promedio" en lugar de obtener la velocidad media. La Figura 6.11 muestra la relación entre la demora promedio y una velocidad media calculada, y el volumen de tránsito, en una intersección urbana controlada con semáforos.

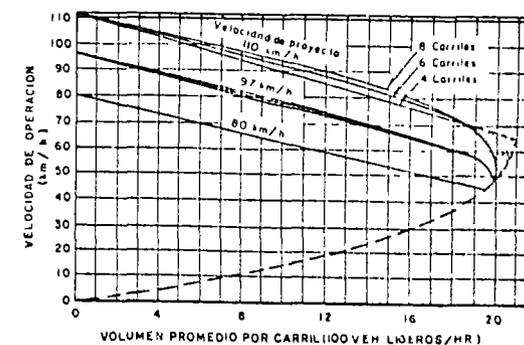
B) Relación velocidad-densidad. Flujo continuo. La relación velocidad-densidad es similar a la relación velocidad-volumen en cuanto a que la velo-



A) Caminos de dos carriles



B) Caminos de carriles múltiples



C) Autopistas y vías rápidas

FIGURA 6.10. RELACIONES ENTRE EL VOLUMEN Y LA VELOCIDAD DE OPERACION, BAJO CONDICIONES DE CIRCULACION CONTINUA, EN CARRETERAS RURALES

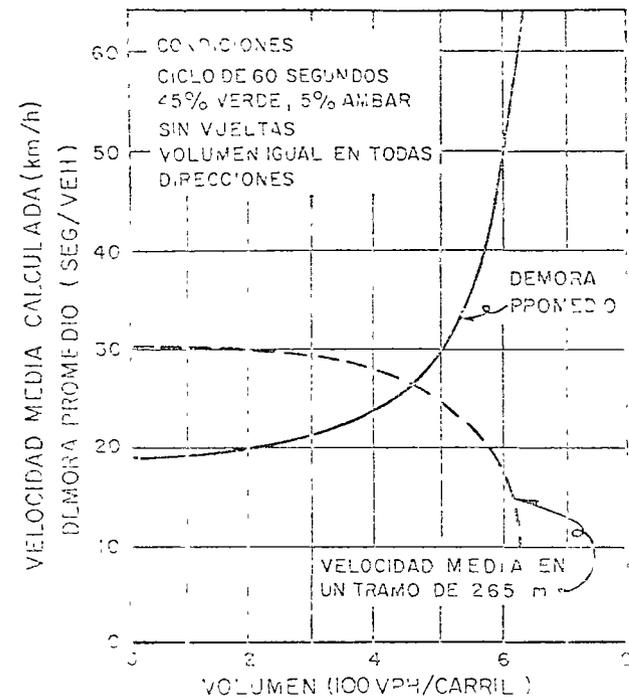


FIGURA 6.11. VELOCIDAD Y DEMORA PROMEDIO CALCULADAS EN UNA INTERSECCION URBANA CONTROLADA CON SEMAFOROS

ciudad decrece conforme el volumen y la densidad aumentan. Sin embargo, la densidad continúa aumentando más allá del punto de densidad crítica, en tanto que el volumen disminuye. Esta característica hace que la densidad sea, en algunos casos, un índice más ventajoso que el volumen para calificar la velocidad.

Experimentalmente se han logrado obtener algunas curvas que muestran la relación velocidad-densidad bajo condiciones de circulación continua en diversos tipos de caminos. La Figura 6.12-A muestra esta relación en una vía rápida, en tanto que la Figura 6.12-B muestra la relación velocidad-densidad en dos caminos sin control de acceso. Debe hacerse notar que si la relación velocidad-volumen es una línea recta, la relación velocidad-densidad no es lineal, por lo menos dentro de un rango entre 12.5 veh/km y 100 veh/km.

Como resultado de los estudios anteriormente citados se ha sugerido que la circulación del tránsito podría describirse mejor, considerando tres zonas distintas: una zona de circulación normal o estable, una zona de circulación inestable y una zona de circulación forzada.

Flujo discontinuo. Los mismos problemas encontrados en los estudios de la relación velocidad-volumen se presentan en los estudios de la relación velocidad-densidad en condiciones de flujo discontinuo. Sin embargo,

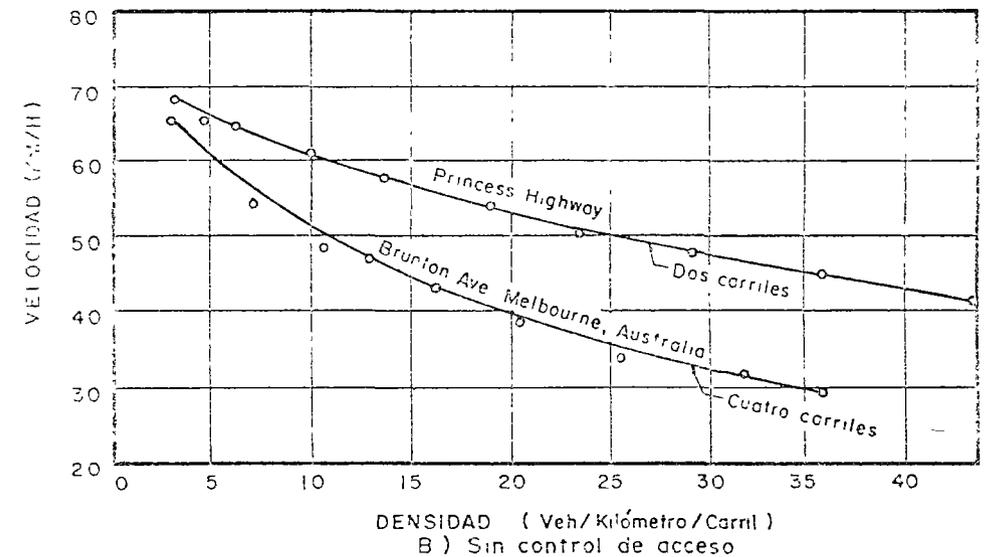
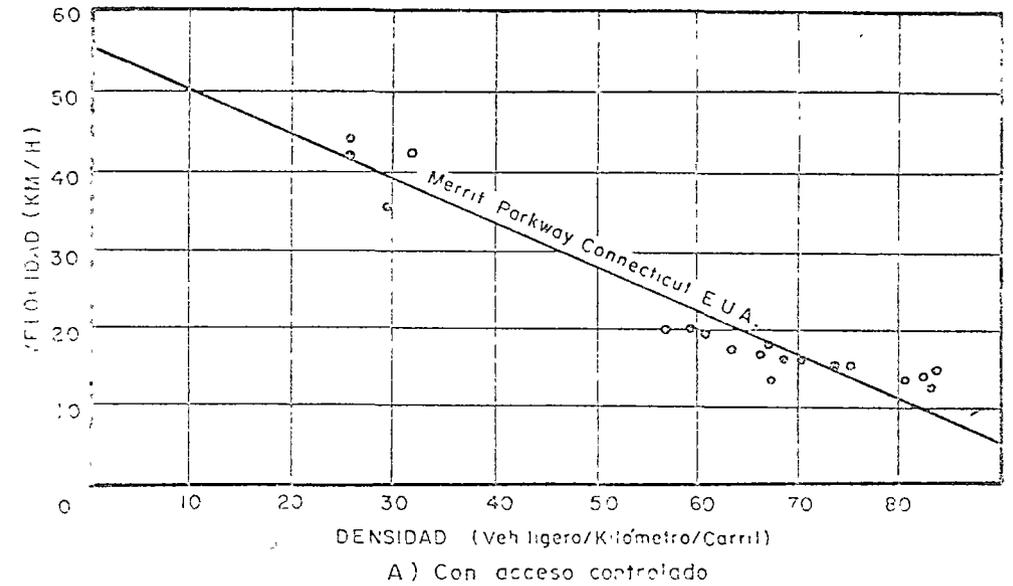


FIGURA 6.12. RELACION VELOCIDAD-DENSIDAD BAJO CONDICIONES DE CIRCULACION CONTINUA EN LOS CAMINOS INDICADOS

se han efectuado con éxito estudios que indican que la relación velocidad-densidad en condiciones de flujo discontinuo es muy semejante a la de flujo continuo, como se ilustra en la Figura 6.13.

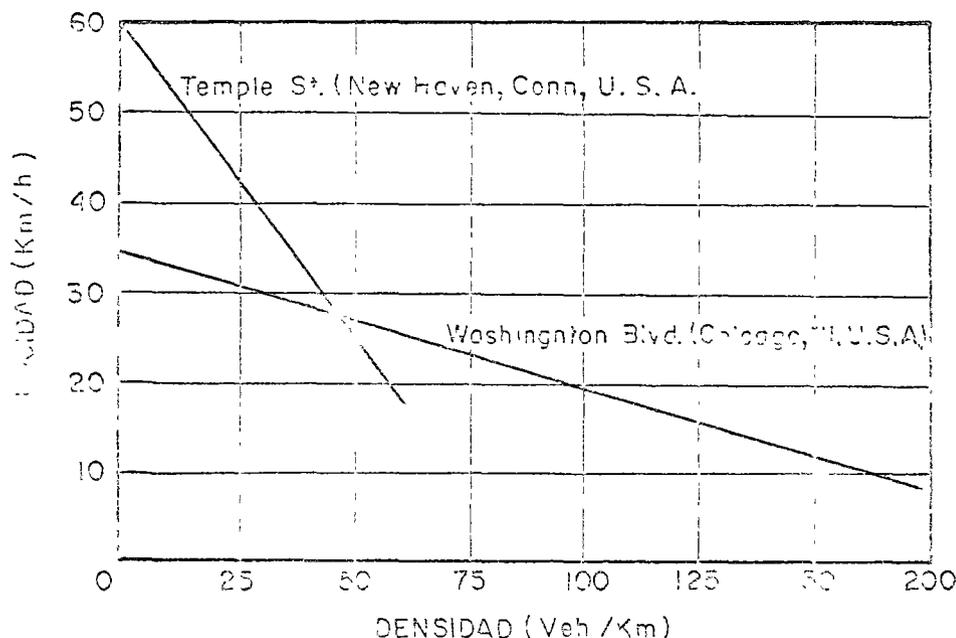


FIGURA 6.10. RELACION VELOCIDAD-DENSIDAD BAJO CONDICIONES URBANAS DE FLUJO DISCONTINUO

C) Relación volumen-densidad. A velocidad constante, un aumento en la densidad resulta en un incremento proporcional del volumen, y viceversa. En cierto punto sin embargo, conforme la densidad aumenta, la velocidad disminuye, y la relación se convierte en curvilínea. Finalmente, pasando el punto de densidad crítica, hay una disminución en el volumen a pesar de que la densidad continúa aumentando, tal como se muestra en la Figura 6.14.

6.4 CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO

6.4.1 Capacidad para condiciones de circulación continua

Los volúmenes máximos observados, junto con los resultados del análisis de las características del tránsito, han servido de guía para establecer valores numéricos de la capacidad para diferentes tipos de caminos bajo condiciones ideales. La capacidad de un camino determinado variará en la medida en que sus características geométricas y de operación difieran de las condiciones ideales. Las condiciones ideales se definen como sigue:

1. Circulación continua, libre de interferencias tanto de vehículos como de peatones.

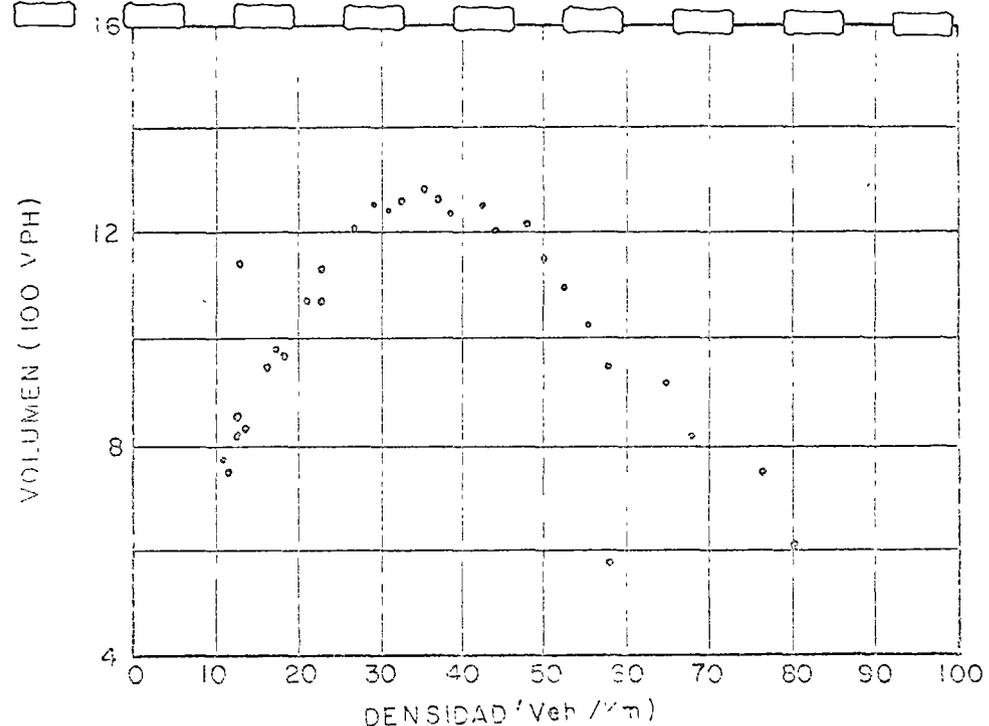


FIGURA 6.14. RELACION VOLUMEN-DENSIDAD BAJO CONDICIONES DE CIRCULACION CONTINUA (HOLLAND TUNNEL, NEW YORK, U.S.A.)

2. Únicamente vehículos ligeros en la corriente del tránsito.

3. Carriles de 3.65 m de ancho, con acotamientos adecuados y sin obstáculos laterales en 1.80 m a partir de la orilla de la calzada.

4. Para caminos rurales, alineamiento horizontal y vertical adecuado para velocidades de proyecto de 110 km/h o mayores y sin restricciones en la distancia de visibilidad de rebase, en caminos de dos carriles.

Algunas autopistas modernas satisfacen con bastante aproximación los requisitos de las condiciones ideales, pero la mayor parte de los caminos se alejan, en mayor o menor grado, de ellas.

Es importante hacer énfasis en que las condiciones ideales no implican, por sí mismas, una buena operación. Aunque las condiciones ideales sí producen mayores volúmenes, la operación puede no ser satisfactoria.

A) Capacidad bajo condiciones ideales en carreteras de carriles múltiples. En este tipo de caminos, el mayor número de vehículos que pueden circular por un solo carril, bajo condiciones ideales, oscila entre 1900 y 2200 vehículos ligeros por hora. Estos valores son el promedio de los volúmenes en todos los carriles y representan un tránsito sostenido durante una hora. En varios estudios se han observado volúmenes más altos en

carriles específicos o en ciertos períodos de tiempo, alcanzando éstas un orden de 2 400 a 2 800 vph, pero no representarán volúmenes costeados en todos los carriles. Dado fines de cálculo, se considera que la capacidad de una carretera de carriles múltiples, bajo condiciones ideales, es de 2 000 vehículos ligeros por hora y por carril, sin tomar en cuenta la distribución del tránsito entre carriles.

B) Capacidad bajo condiciones ideales en carreteras de dos carriles con dos sentidos. Los conductores en estas carreteras ejecutan los rebases invadiendo el carril utilizado por el tránsito de sentido contrario. Los vehículos que se mueven lentamente, originan espacios libres que pueden ser cubiertos por los vehículos que rebasan; si los espacios libres son de suficiente longitud, permiten además que los vehículos que circulan en sentido opuesto efectúen maniobras de rebasa. La operación durante condiciones de altos volúmenes puede, por lo tanto, entre una circulación en que los vehículos forman líneas con espacios libres entre ellos y una circulación en que algunos vehículos efectúan maniobras de rebasa cubriendo parcialmente los espacios libres. La capacidad de una carretera de dos carriles y dos sentidos de circulación bajo condiciones ideales es de 2 000 vehículos ligeros por hora en ambos sentidos, sin importar la distribución del tránsito.

C) Capacidad bajo condiciones ideales en carreteras de tres carriles con dos sentidos. La operación en este tipo de caminos es similar a la de las carreteras de dos carriles con dos sentidos de circulación, con la única diferencia de que el tercer carril sirve para efectuar maniobras de rebasa para cualquiera de los dos sentidos, razón por la cual, la capacidad por sentido de circulación y bajo condiciones ideales se puede equiparar a la que se tendría por carril en un sentido de cuatro carriles con dos en cada sentido, puesto que al utilizar el carril central para las maniobras de rebasa, se venan los espacios libres entre ellos los vehículos. Entonces, bajo condiciones ideales, la capacidad de una carretera de tres carriles y dos sentidos de circulación es de 4 000 vehículos ligeros por hora para ambos sentidos, sin importar la distribución del tránsito.

D) Las capacidades para los tipos de carreteras citados bajo condiciones ideales, se resumen en la tabla 6-A.

TIPO DE CARRETERA	CAPACIDAD (VPH)
Carriles múltiples	2 000 por carril
Dos carriles, dos sentidos	2 000 total ambas direcciones
Tres carriles, dos sentidos	4 000 total ambas direcciones

TABLE 6-A. CAPACIDADES BAJO CONDICIONES IDEALES, EN CARRETERAS CON CIRCULACION CONTINUA

3.1.5 Capacidad para flujos de circulación discreta

La diferencia de la circulación continua, no es posible definir la capacidad para un carril discreta bajo condiciones ideales con los va-

los vehículos, así como el de los vehículos que circulan en los carriles de los elementos que producen las interrupciones; cualquier elemento controlado con semáforo es uno de estos elementos, aunque algunas interrupciones a medio calle pueden ser igualmente de significación.

Hablando en términos generales, dos limitaciones básicas pueden establecerse:

A) Difícilmente un carril de tránsito de una arteria urbana, con la proporción uniforme e ideal de los semáforos, conduce a un volumen mayor de 2 000 vehículos ligeros por hora de luz verde de semáforo.

B) Una hilera de vehículos que se encuentran detenidos, en raras ocasiones se moverá, a partir de la interrupción, en una proporción mayor de 2 500 vehículos por carril y por hora de luz verde de semáforo, cuando esta la interrupción.

3.1.6 Niveles de servicio

Cuando el volumen de tránsito iguala a la capacidad de la carretera, las condiciones de operación son deficientes aun bajo las condiciones ideales de la vía y del tránsito ya que las velocidades son bajas, con frecuentes atascos y demoras. Para que una carretera suministre un nivel de servicio aceptable, es necesario que el volumen de servicio sea menor que la capacidad de la carretera. El volumen máximo que puede transportarse en cualquier nivel de servicio seleccionado, es llamado volumen de servicio para ese nivel.

El usuario como individuo, tiene una idea limitada del volumen de tránsito, pero se da cuenta del efecto de un alto volumen de tránsito en la posibilidad para transitar por una carretera a una velocidad razonable, con comodidad, conveniencia, economía y seguridad. Por tanto, entre los elementos que pueden ser considerados en la evaluación del nivel de servicio se incluyen los siguientes:

A) Velocidad y tiempo durante el recorrido. Estos elementos incluyen la velocidad de operación y el tiempo empleado durante el recorrido de un tramo de la carretera.

B) Interrupciones de tránsito o restricciones. El número de paradas por kilómetro, las demoras que éstas implican, la magnitud y la frecuencia en los cambios de velocidad necesarios para mantener la corriente de tránsito.

C) Libertad para maniobrar. Considera el grado de libertad para conducir manteniendo la velocidad de operación deseada.

D) Seguridad. Se refiere a evitar los accidentes y los riesgos potenciales.

E) Comodidad en el manejo. Considera el efecto de las condiciones de la carretera y del tránsito, así como el grado en que el servicio proporcionado por la carretera satisface las necesidades normales del conductor.

F) Economía. Considera el costo de operación del vehículo en la carretera.

Teóricamente, todos estos factores deberían incorporarse en la evaluación del nivel de servicio. Hasta el momento, sin embargo, no existen suficientes datos para determinar el valor relativo de algunos de los factores mencionados.

Después de consideraciones cuicerosas, se eligió la velocidad durante el recorrido, como el factor principal para identificar el nivel de servicio. Se considera, además un segundo factor que puede ser la relación volumen de demanda a capacidad, o bien, la relación volumen de servicio a capacidad, dependiendo del problema que se presente en una situación particular.

En la práctica, el segundo factor se refiere a la relación v/c . En problemas donde la demanda y la capacidad son conocidas y se desea obtener el nivel de servicio, v representa primordialmente la demanda; en cambio, cuando la capacidad y el nivel de servicio requeridos se especifican, v representa el volumen de servicio calculado.

La velocidad durante el recorrido usada como medida de nivel de servicio, puede ser la velocidad de operación o la velocidad global, dependiendo del tipo de camino. Las velocidades de operación se usan para aquellos caminos que tienen generalmente circulación continua, los cuales se encuentran en zonas rurales. La velocidad global se utiliza para arterias urbanas y calles del centro de la ciudad, en las cuales generalmente existe circulación discontinua.

Cada nivel de servicio debe considerarse como un rango de condiciones de operación, limitado por los valores de la velocidad durante el recorrido y por las relaciones volumen-capacidad.

Si bien, los valores de la velocidad y de los volúmenes de servicio tienen por objeto determinar los límites de un nivel de servicio, se considera que estos representan la velocidad más baja aceptable y el volumen más alto del rango de ese nivel de servicio. Cuando las velocidades son altas y los volúmenes de servicio son más bajos que los valores dados, las condiciones de operación son mejores que las correspondientes a ese nivel de servicio. Conforme la densidad del tránsito se incrementa, la calidad del servicio baja, sólo por coincidencia se alcanzarán simultáneamente el límite inferior del rango de velocidades de operación y el límite superior del rango de volúmenes; usualmente uno de los límites gobernará en un caso particular. Una vez que se ha rebasado un límite, el servicio caerá al siguiente nivel.

De acuerdo con lo anterior, se ha establecido el siguiente criterio para determinar las relaciones de capacidad y nivel de servicio.

1. El volumen y la capacidad se expresan en número de vehículos ligeros por hora. El volumen de demanda y la capacidad pueden variar considerablemente a lo largo de un tramo de camino y a menudo los valores promedio para un tramo completo, pueden no representar adecuadamente las condiciones reales en todos los puntos de ese tramo. El grado de detalle que se requiere al dividir un tramo particular en subtramos, para su examen por separado, dependerá desde luego de la naturaleza del estudio.

2. El nivel de servicio estrictamente definido es aplicable a un tramo de camino de gran longitud. Este tramo puede acusar variaciones en las condiciones de operación en diferentes puntos o subtramos de su longitud total, debido a cambios en el volumen de demanda o en la capacidad. Las variaciones que surgen en la capacidad son resultado de diferentes condiciones a lo largo del camino, tales como cambios en el ancho, pendientes, enlaces, zonas de entrecruzamiento, restricciones en la distancia a obstáculos laterales e intersecciones. Las variaciones en el volumen de demanda son consecuencia de las variaciones en los volúmenes de tránsito que entran y salen en puntos irregularmente espaciados a lo largo del camino. El nivel de servicio del tramo deberá, dentro de ciertos límites, tomar en cuenta

el efecto de estos puntos y las limitaciones que los subtramos tienen sobre el tramo en estudio.

3. El análisis del volumen y de la velocidad de operación o velocidad global, se hace para cada punto o subtramo del camino. La velocidad de operación ponderada, o la velocidad global, se determina para el tramo completo, identificando de esta manera el nivel de servicio correspondiente.

4. Los elementos que se usan para medir la capacidad y los niveles de servicio, son variables cuyos valores pueden ser fácilmente obtenidos de los datos disponibles. Para la capacidad, estos elementos incluyen: el tipo de camino, las características geométricas, la velocidad de proyecto, la composición del tránsito y las variaciones en el volumen. Para el nivel de servicio, los elementos adicionales que se usan, incluyen la velocidad y las relaciones volumen-capacidad.

5. Para uso práctico, los valores de la capacidad y de las relaciones volumen-capacidad que definen los niveles de servicio, se establecen para cada uno de los siguientes tipos de caminos:

- a) Autopistas y vías rápidas
- b) Carreteras de carriles múltiples
- c) Carreteras de dos y de tres carriles
- d) Arterias urbanas
- e) Calles del centro de la ciudad.

ELEMENTO	AUTOPISTAS	CARRETERAS DE DOS Y MÚLTIPLES CARRILES	CARRETERAS DE DOS Y TRES CARRILES	ARTERIAS URBANAS	CALLES DEL CENTRO DE LA CIUDAD
ELEMENTOS BASICOS:					
Velocidad de Operación para el tramo	X	X	X		
Velocidad Global				X	X
Relación Volumen-Capacidad:					
a) Punto más crítico	X	X	X	X	
b) Cada subtramo	X	X	X	X	
c) Tramo completo	X	X	X	X	
ELEMENTOS ASOCIADOS:					
a) Velocidad de Proyecto ponderada	X	X	X		
b) Número de carriles	X	X			
c) Distancia de visibilidad			X		

TABLA 6-B ELEMENTOS USADOS PARA EVALUAR EL NIVEL DE SERVICIO

Los niveles de servicio se establecen para diferentes puntos del camino, incluyendo intersecciones, enlaces y zonas de entrecruzamiento.

6. El criterio elegido para evaluar el nivel de servicio en los diferentes tipos de caminos, se muestra en la tabla 6-B.

6.4.4 Condiciones de operación para los diferentes niveles de servicio

Se distinguen seis niveles de servicio, para la identificación de las condiciones existentes al variar la velocidad y los volúmenes de tránsito, en una carretera.

Los niveles de servicio designados con las letras de A a la F, del mejor al peor, comprenden la clasificación total de las operaciones de tránsito que pueden ocurrir.

El nivel de servicio A corresponde a una condición de flujo libre, con volúmenes de tránsito bajos y velocidades altas. La densidad es baja, y la velocidad depende del deseo de los conductores dentro de los límites impuestos y bajo las condiciones físicas de la carretera. No hay restricción en las maniobras ocasionadas por la presencia de otros vehículos; los conductores pueden mantener las velocidades deseadas con escasa o ninguna demora.

El nivel de servicio B corresponde a la zona de flujo estable, con velocidades de operación que comienzan a restringirse por las condiciones del tránsito. Los conductores tienen una libertad razonable para elegir sus velocidades y el carril de operación. Las reducciones de velocidad son razonables, con una escasa probabilidad de que el tipo del tránsito se reduzca.

El nivel de servicio C se encuentra en la zona de flujo estable, pero las velocidades y posibilidades de maniobra están más estrechamente controladas por los altos volúmenes de tránsito. La mayoría de los conductores perciben la restricción de su libertad para elegir su propia velocidad, cambiar de carriles o rebasar; se obtiene una velocidad de operación satisfactoria.

El nivel de servicio D se aproxima al flujo inestable con velocidades de operación aún satisfactorias, pero afectadas considerablemente por los cambios en las condiciones de operación. Las variaciones en el volumen de tránsito y las restricciones momentáneas al flujo, pueden causar un descenso importante en las velocidades de operación. Los conductores tienen poca libertad de maniobra con la consecuente pérdida de comodidad.

El nivel de servicio E no puede describirse solamente por la velocidad, pero representa la operación a velocidades aún más bajas que el nivel D, con volúmenes de tránsito correspondientes a la capacidad. El flujo es inestable y pueden ocurrir paradas de corta duración.

El nivel de servicio F corresponde a circulación forzada, las velocidades son bajas y los volúmenes inferiores a los de la capacidad. En estas condiciones frecuentemente se producen colas de vehículos a partir del lugar en que se produce la restricción. Las velocidades se reducen y pueden producirse paradas debidas al congestionamiento. En los casos extremos, tanto la velocidad como el volumen, puede descender a cero.

El concepto general de los niveles de servicio mencionados se muestra gráficamente en la Figura 6.15 y se ilustra con las fotografías de la Figura 6.16.

6.5 FACTORES QUE AFECTAN LA CAPACIDAD Y EL VOLUMEN DE SERVICIO

Cuando las condiciones de un camino son ideales, la capacidad o el volumen de servicio a un nivel dado, son máximos. A medida que las condiciones del camino se alejan de las ideales, la capacidad o el volumen de servicio, se reducen. En consecuencia, en la mayoría de los caminos se tienen que aplicar factores de ajuste a la capacidad o al volumen de servicio, en condiciones ideales. Estos factores pueden dividirse en dos categorías: factores relativos al camino y factores relativos al tránsito.

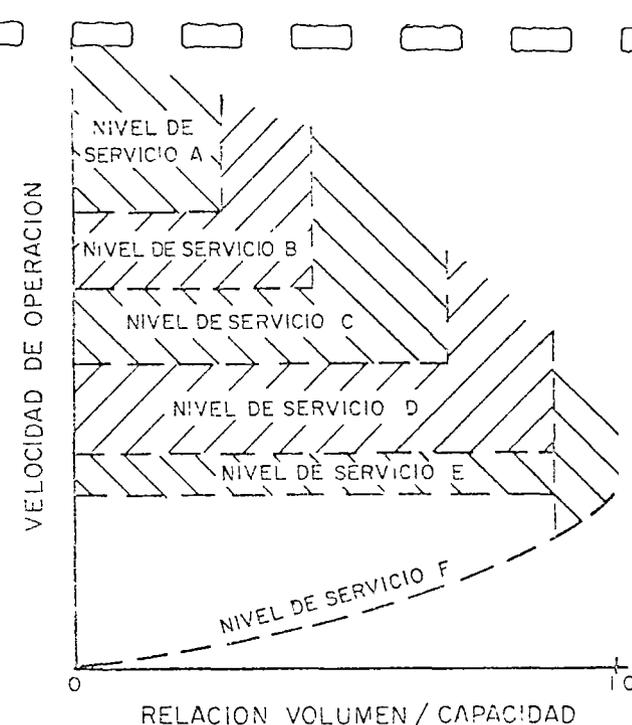


FIGURA 6.15 CONCEPTO GENERAL DE LOS NIVELES DE SERVICIO

Los factores mencionados reflejan la influencia de ciertos elementos en la capacidad, e indirectamente reflejan su efecto en la seguridad del camino, pues casi siempre que un elemento reduce el volumen de servicio es causa potencial de accidentes. No obstante, existen otros elementos que sin reducir el volumen, afectan la seguridad.

A la fecha, no se han evaluado todos los factores que afectan a la capacidad o el volumen de servicio, ni se ha determinado su influencia con exactitud.

6.5.1 Factores relativos al camino

Los factores relativos al camino son todos aquellos elementos físicos, propios del diseño geométrico, que tienen influencia directa o indirecta en la capacidad y en el volumen de servicio. Estos factores son: el ancho de carril, los obstáculos laterales, los acotamientos, los carriles auxiliares, las condiciones de la superficie de rodamiento y las características de los alineamientos horizontal y vertical.

A) Ancho de carril. Los carriles más angostos que 3.65 m tienen menor capacidad en condiciones de circulación continua, que los carriles de esa dimensión aceptados como ideales. En caminos de dos carriles, un

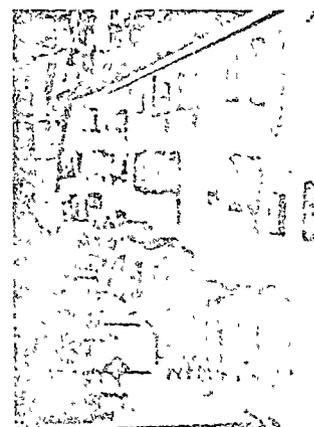
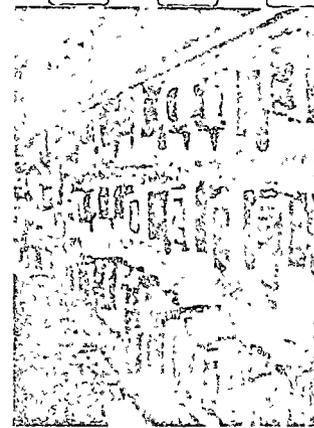
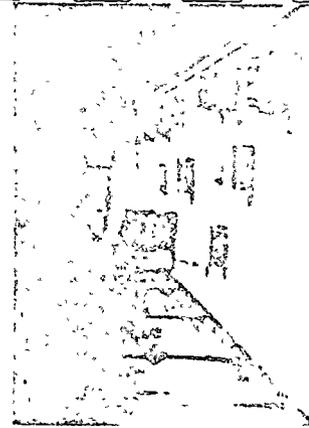


FIGURA 6 16 NIVELES DE SERVICIO

vehículo que realiza una maniobra de rebase tiene que invadir el carril izquierdo en un período más largo si los carriles son angostos que cuando son anchos, con la consiguiente reducción en la capacidad. En las carreteras de varios carriles, un mayor número de vehículos invade o sobrepasa las líneas de carril cuando los carriles son angostos, ocupando dos carriles en vez de uno, reduciendo la capacidad por carril.

B) Obstáculos laterales. Los obstáculos laterales, tales como muros, postes, árboles, señales, estribos de pasos a desnivel, parapetos de puentes y vehículos estacionados, que se encuentran a menos de 1.80 m de la orilla de un carril de tránsito, reducen el ancho efectivo de ese carril. Los obstáculos con 0.20 m o menos de altura, como las guarniciones, no tienen influencia significativa en el ancho del carril.

Cuando los obstáculos laterales no son continuos en toda la longitud del camino, una obstrucción aislada puede constituir un estrangulamiento. Sin embargo, esta condición ocurre para altos volúmenes de tránsito; a volúmenes bajos, el mismo obstáculo no produce ningún efecto. Por otra parte, cuando el obstáculo lateral persiste en un tramo largo de carretera, el conductor llega a acostumbrarse a él, de tal manera que después de un tiempo, el efecto del obstáculo en el ancho del carril es menor. Es importante analizar cada caso en especial, teniendo en mente el volumen de servicio, la altura del obstáculo y la longitud del mismo. Cabe hacer notar que la distancia de 1.80 m a los obstáculos laterales, considerada ideal desde el punto de vista de la capacidad, no necesariamente es la ideal desde el punto de vista de la seguridad.

C) Combinación del ancho de carril y la distancia a obstáculos laterales. Dado que los obstáculos laterales producen el mismo efecto que el ancho de carril, en la práctica puede considerarse el efecto combinado de ambos elementos. En las tablas 6-D, 6-J y 6-L se muestra el efecto combinado del ancho de carril y de la distancia a obstáculos laterales en uno o en ambos lados de la calzada, para los diferentes tipos de camino. Cuando los obstáculos laterales existen en ambos lados pero a diferente distancia, se promedian los factores correspondientes.

D) Acotamientos. En ninguna ocasión son más necesarios los acotamientos de ancho suficiente, que cuando se están usando los carriles a toda su capacidad. Si no se tiene un lugar de refugio fuera de los carriles de tránsito, un vehículo que se descomponga puede reducir la capacidad del camino en más de lo que corresponde a la capacidad de un carril, especialmente si los carriles son de un ancho menor de 3.65 m. El vehículo averiado obstruye el carril por él ocupado y además, reduce la capacidad de los carriles adyacentes, puesto que los demás vehículos deben circular en menos carriles y con velocidades más bajas que la prevista. En estas condiciones, una avería secundaria de otro vehículo que reduzca la velocidad aún más, puede causar el congestionamiento total del camino.

Además de mantener la capacidad de la carretera proporcionando refugio a los vehículos descompuestos, los acotamientos pueden incrementar el ancho efectivo del camino. Para carriles con anchos menores de 3.65 m, los acotamientos con un ancho de 1.20 m o más, incrementan el ancho efectivo de los carriles adyacentes en 0.30 m.

E) Carriles auxiliares. Un carril auxiliar es la parte adicional a la calzada, en una longitud limitada, que se usa para: estacionamiento momentáneo, cambios de velocidad, entrecruzamiento, vueltas, separación de vehicu-

los lentos en pendientes ascendentes, y otros fines que auxilien a la circulación del tránsito de la vía principal.

Los carriles auxiliares se diseñan para permitir la utilización efectiva de la carretera y mejorar el nivel de servicio de los carriles principales de tránsito, evitando los congestionamientos. En consecuencia, no tienen un efecto directo en la capacidad de la vía principal.

F) Estado de la superficie de rodamiento. El deterioro de la superficie de rodamiento afecta adversamente el nivel de servicio, sobre todo en lo referente a velocidad, comodidad, economía y principalmente, seguridad. No obstante, en las carreteras con altos volúmenes de tránsito, es raro que la conservación sea tan deficiente que no puedan obtenerse velocidades de 50 km/h, velocidad aproximada a la cual se alcanza la capacidad.

A la fecha, no se han podido determinar factores que reflejen el efecto del estado de la superficie de rodamiento, cuando esté deteriorada; la velocidad de operación es menor a aquella que se obtendría con una superficie en buen estado, a menos que con sacrificio de la seguridad se conserve una velocidad alta.

G) Alineamiento. Los alineamientos horizontal y vertical de un camino afectan en gran medida la capacidad y el nivel de servicio del mismo. En general, los alineamientos están diseñados en base a la velocidad de proyecto; sin embargo, como ésta puede variar a lo largo del camino debido a la configuración del terreno, lo que se utiliza es un promedio ponderado, que refleje con mayor veracidad las condiciones requeridas para el nivel de servicio.

En el alineamiento vertical, las restricciones a las distancias de visibilidad de rebase se consideran a través del porcentaje de la longitud del tramo de camino en estudio, que tiene distancias de visibilidad menores que la distancia de visibilidad de rebase, la cual para efectos de capacidad, se ha considerado de 500 m. Las restricciones a estas distancias de visibilidad tienen efecto solamente en los caminos de dos carriles.

El efecto de la velocidad de proyecto ponderada y de la distancia de visibilidad de rebase, está considerado en los valores de la relación v/c de las tablas de cálculo correspondientes (6-C, 6-I y 6-K) citadas más adelante.

Los alineamientos tienen su efecto principal en el volumen de servicio; sin embargo, también afectan a la capacidad, aunque en menor grado.

H) Pendientes. Las pendientes afectan a los volúmenes de servicio en las siguientes formas:

1. Reduciendo la distancia de visibilidad de rebase, en caminos de dos carriles.

2. Reduciendo o aumentando las distancias de frenado en pendientes ascendentes o descendentes respectivamente, lo cual ocasiona espaciamientos más cortos entre vehículos que están subiendo una pendiente, o bien, aumenta el espaciamiento entre vehículos que descienden, ya que éstos tienen que mantener una distancia de seguridad.

3. Reduciendo la velocidad de los vehículos pesados en pendientes ascendentes, interfiriendo a los vehículos ligeros.

En lo que concierne al análisis de la operación del camino, lo que interesa conocer es el efecto de las pendientes sobre la velocidad de los vehículos pesados y la influencia que tiene esta reducción de velocidad en los volúmenes y niveles de servicio del camino.

Por lo general, los vehículos pesados inician el ascenso de una pendiente a la mayor velocidad que les permite el alineamiento horizontal y el estado de la superficie de rodamiento. A medida que van subiendo van reduciendo su velocidad, efecto que se hace más marcado en pendientes pronunciadas. Cualquier reducción en la velocidad de los caminos afecta el nivel de servicio, pero la capacidad no se ve afectada mientras la velocidad no sea menor a 50 km/h. Luego, existe una longitud de pendiente más allá de la cual se empieza a reducir la capacidad.

Las relaciones entre la velocidad de los vehículos pesados al iniciar el ascenso, las pendientes y la velocidad a una distancia cualquiera sobre la pendiente, han sido tratadas ya en el capítulo relativo a Elementos Básicos para el Proyecto (Inciso 5.2.2.). Sin embargo, en aplicaciones a problemas de capacidad, en la práctica lo que se necesita no son las características específicas de la velocidad en cada punto de la pendiente, sino las características de la velocidad media en diferentes pendientes y las longitudes de las mismas. Las relaciones correspondientes entre la velocidad media, las pendientes y sus longitudes, están representadas por las curvas de las Figuras 6.17-A, 6.17-B y 6.17-C; estas curvas han sido desarrolladas considerando relaciones peso/potencia, de 90, 120 y 180 kg/HP, representativas de los vehículos pesados de proyecto de dos ejes, tres ejes y cuatro o más ejes, respectivamente.

El conocimiento del efecto de una pendiente particular en la velocidad de los camiones, no es suficiente por sí mismo para determinar su efecto en la capacidad. Es necesario conocer también el efecto que tienen los camiones y autobuses en el volumen y el efecto de cada uno, en términos equivalentes de vehículos ligeros o "vehículos ligeros equivalentes". En consecuencia, para determinar el efecto de la pendiente en la capacidad, la información presentada aquí, se aplica en combinación con la señalada en el inciso 6.5.2, correspondiente a "Factores relativos al tránsito" y específicamente en el apartado A), relativo a camiones.

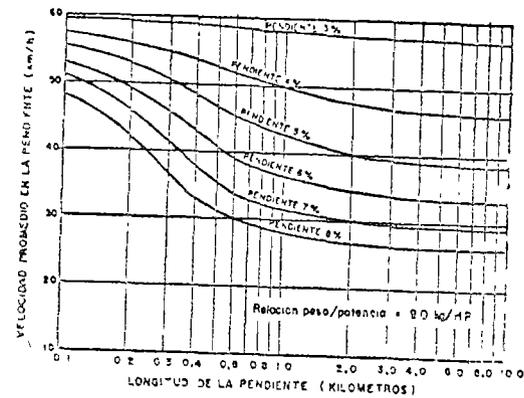
I) Carriles auxiliares de ascenso. La mayor diferencia entre la velocidad de un vehículo pesado y la de un vehículo ligero, ocurre en pendientes fuertes y sostenidas. En estos tramos el número de vehículos ligeros equivalentes por vehículo pesado es superior al equivalente para terrenos planos, lo cual se traduce en volúmenes de servicio más bajos.

Los carriles auxiliares de ascenso constituyen una solución para mejorar la capacidad y el nivel de servicio en pendientes sostenidas fuertes, pues se reduce substancialmente el efecto de los vehículos pesados en la carretera. En general, suele proporcionarse un carril auxiliar de ascenso cuando el tránsito sea tal, que si no se contara con el carril adicional, el nivel de servicio sería inferior al deseado.

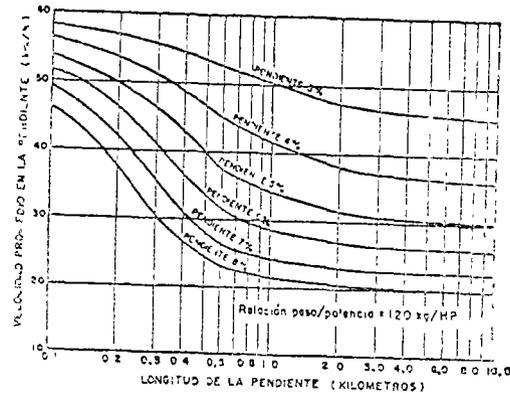
No puede establecerse un criterio general para su uso, pues en cada caso la localización del carril adicional tiene una influencia decisiva.

6.5.2 Factores relativos al tránsito

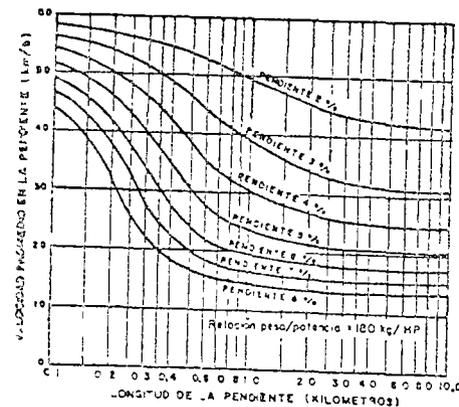
Los factores relativos al tránsito son todos aquellos que tienen influencia en la capacidad y el volumen de servicio de un camino, tales como la composición, distribución y variación del tránsito y los hábitos y deseos del conductor. Los factores principales que influyen en la capacidad y/o el volumen de servicio son: los camiones, los autobuses, la



- A -



- B -



- C -

FIGURA 6.17. VELOCIDAD PROMEDIO DE LOS VEHICULOS PESADOS EN DIFERENTES PENDIENTES

distribución por carril, la variación en el volumen de tránsito y las interrupciones del mismo.

A) Camiones. Los camiones reducen la capacidad de un camino en términos del total de vehículos que circulan por hora. Cada camión desplaza a varios vehículos ligeros en la circulación; a este número de vehículos, como ya se mencionó anteriormente, se le llama "vehículos ligeros equivalentes". En terreno plano donde los camiones circulan a velocidades semejantes a la de los vehículos ligeros, un camión equivale a dos vehículos ligeros en carreteras de varios carriles y a dos o tres en carreteras de dos carriles. Dependiendo del nivel de servicio, estos valores son apropiados para pendientes descendentes.

En pendientes ascendentes, el número de vehículos ligeros equivalentes varía ampliamente, dependiendo de lo pronunciado y de la longitud de la pendiente, así como del número de carriles.

Para un análisis aproximado de la operación es suficiente con usar un solo número de vehículos equivalentes; sin embargo, un análisis detallado requerirá emplear el número de vehículos ligeros equivalentes para cada pendiente, de acuerdo con su longitud y magnitud.

1. Caminos de dos carriles. En caminos de dos carriles, el número de vehículos ligeros equivalentes puede determinarse obteniendo las velocidades y espaciamientos de los vehículos a diversos volúmenes de tránsito en carreteras con diferentes alineamientos, obteniéndose un valor medio de la equivalencia de vehículos ligeros para cada condición. Si la determinación se realiza con mayor detalle, pueden obtenerse los vehículos ligeros equivalentes por cada tipo de camión, clasificándolos por grupos de acuerdo a su velocidad.

El número de vehículos ligeros equivalentes, para niveles de servicio B y C en tramos de gran longitud, que incluyan tanto pendientes ascendentes como descendentes combinadas con tramos a nivel, es de cinco para caminos en lomerío y diez para caminos en terreno montañoso. En los niveles de servicio D y E son de cinco y doce respectivamente.

La equivalencia de vehículos ligeros para cualquier nivel de servicio en una pendiente ascendente sostenida, se incrementa conforme disminuye la velocidad de los camiones, debido a que es mayor la diferencia entre la velocidad normal de los vehículos ligeros y la de los camiones. La equivalencia se incrementa mucho más a niveles de servicio más bajos, debido a que el rebase se dificulta cada vez más, hasta que finalmente se hace imposible. Sin embargo, en caminos de dos carriles, el equivalente de vehículos ligeros aparentemente cambia muy poco si no es que nada, con un cambio en el porcentaje de camiones, cuando las características geométricas del camino se mantienen constantes.

La Figura 6.18 muestra la forma en que varía la equivalencia de vehículos ligeros, con la variación de la velocidad media de los camiones, cuando éstos circulan en cualquier pendiente de un camino de dos carriles.

Con las velocidades medias de los camiones en las pendientes, indicadas en las curvas de las Figuras 6.17-A, 6.17-B y 6.17-C y las curvas de equivalencias de la Figura 6.18, se han obtenido los valores de vehículos ligeros equivalentes por camión, representativos de los vehículos de proyecto cuyas relaciones peso/potencia son de 90, 120 y 180 kg/HP. Estos valores se muestran en las tablas 6-N.1, 6-N.2 y 6-N.3.

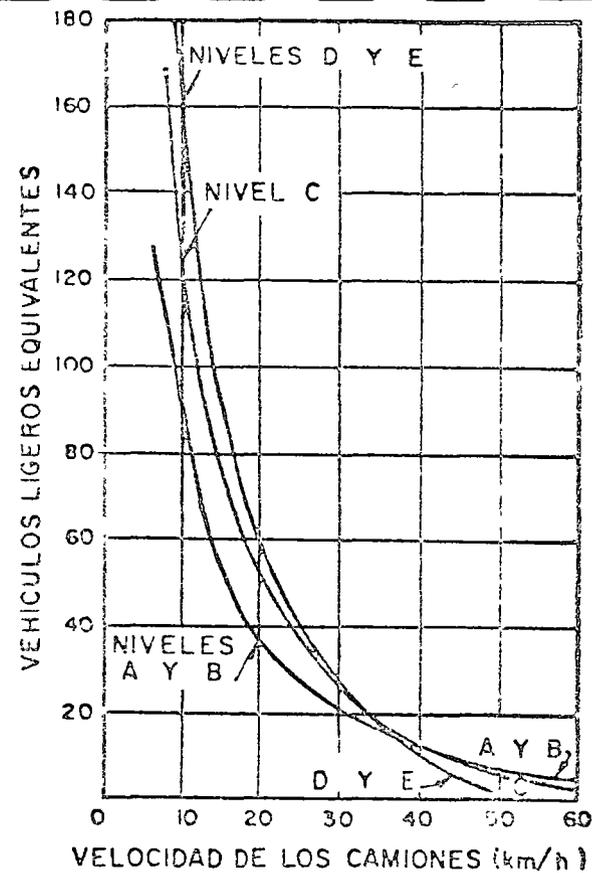


FIGURA 6.18. VEHICULOS LIGEROS EQUIVALENTES POR CAMION, PARA DIFERENTES VELOCIDADES MEDIAS DE LOS CAMIONES EN CARRETERAS DE DOS CARRILES

Cualquier volumen de tránsito mixto puede convertirse en vehículos ligeros equivalentes, multiplicando por el factor de ajuste de camiones: $(100 - P_T + E_T P_T)/100$, en donde P_T es el porcentaje de camiones y E_T los vehículos ligeros equivalentes a un camión.

Análogamente, cualquier volumen de vehículos ligeros puede convertirse a tránsito mixto, multiplicándolo por el factor: $100/(100 - P_T + E_T P_T)$.

2. Caminos de carriles múltiples. En caminos de varios carriles, el efecto de los camiones en la capacidad, presenta aún más incertidumbre que para caminos de dos carriles, debido a que no está bien definido el efecto que produce la distribución del tránsito por carril, las maniobras de rebase entre camiones y los factores psicológicos de los conductores. Estas influencias hacen que la obtención de los vehículos ligeros equivalentes por los métodos usados para caminos de dos carriles, se convierta en una tarea mucho más compleja.

La investigación en este campo ha sido bastante limitada y la que se ha llevado a cabo ha sido restringida principalmente al nivel de servicio B. La Figura 6.19 muestra los resultados de esta investigación. Los vehículos ligeros equivalentes, que se usarán más adelante en la determinación de capacidades y volúmenes de servicio en carreteras de carriles múltiples, han sido obtenidos tomando como base la investigación antes citada para el nivel de servicio B, racionalizando los valores para otros niveles.

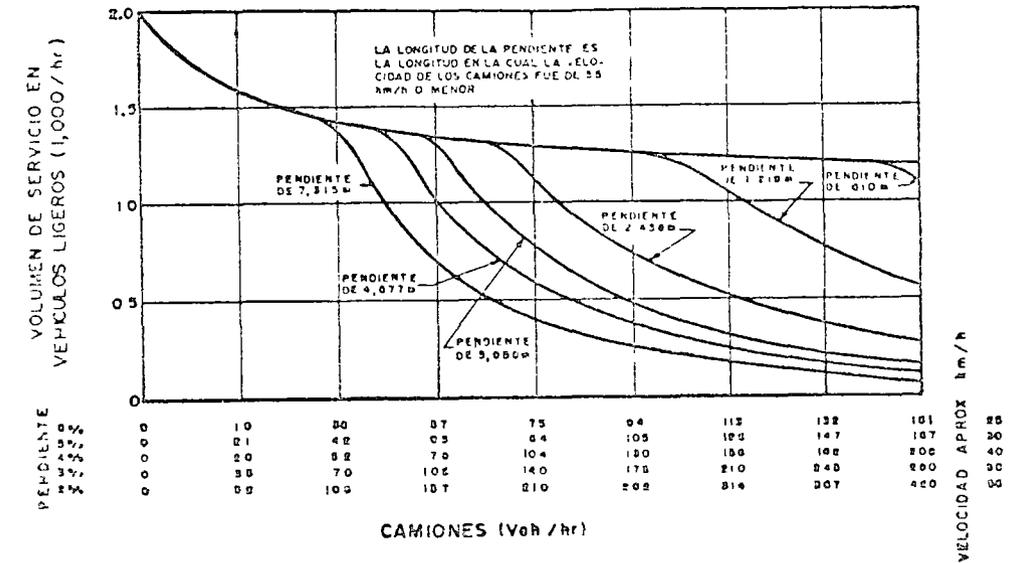


FIGURA 6.19. VOLUMENES DE SERVICIO EQUIVALENTES POR CAMION EN FUNCION DE LAS PENDIENTES EN CAMINOS CON DOS CARRILES EN UN SENTIDO DE CIRCULACION, A NIVEL DE SERVICIO B

El número de vehículos ligeros equivalentes que se ha considerado para niveles de servicio de B a E, es de cuatro para caminos en terreno de lomerío y de ocho para caminos en terreno montañoso. En la obtención de estas equivalencias no se hace distinción entre autopistas y caminos de carriles múltiples.

Para aquellos casos en que el análisis involucre subtramos específicos o pendientes pronunciadas sostenidas, las equivalencias de vehículos ligeros por camión que deben aplicarse se indican en la tabla 6-G.

De la misma manera que para caminos de dos carriles, el volumen de servicio en vehículos ligeros puede convertirse a tránsito mixto y viceversa.

B) Autobuses. Los autobuses foráneos afectan la capacidad o volumen de servicio de manera semejante a los camiones, pero en menor grado. Los estudios disponibles permiten suponer que el número de ye-

hículos ligeros equivalentes por autobuses es de uno punto seis, tres y cinco, para caminos de carriles múltiples, y de dos, cuatro y seis, para caminos de dos carriles, en terreno plano, en lomerío y montañoso, respectivamente.

En la práctica rara vez se toma en cuenta el efecto de los autobuses y por lo general se consideran como camiones; sin embargo, es necesario considerarlos cuando el volumen de autobuses es importante o se encuentran fuertes pendientes. El factor de ajuste para convertir el tránsito mixto a vehículos ligeros se obtendrá de la siguiente expresión: $(100 - P_B + E_B P_B) / 100$, en donde P_B es el porcentaje de autobuses en la corriente del tránsito y E_B es el número de vehículos ligeros equivalentes por autobús.

C) Distribución por carril. En las carreteras de carriles múltiples no todos los carriles llevan el mismo volumen de tránsito y su distribución por carril es un factor que debe tomarse en cuenta en la determinación de la capacidad. Sin embargo, no es necesario hacer un ajuste especial, porque en donde este problema es importante, como por ejemplo en los enlaces y en los entrecruzamientos, su efecto está considerado en el diseño de estos elementos.

D) Variaciones en el volumen de tránsito. En general, el volumen horario de proyecto se determina aplicando un porcentaje al tránsito promedio diario anual.

Esta determinación considera implícitamente la variación del volumen horario durante las horas de todo un año. Sin embargo, en algunas carreteras o elementos de ellas, no basta considerar la fluctuación del volumen horario en el año, sino que se requiere conocer la fluctuación en intervalos de tiempo menores de una hora. Esta fluctuación se considera a través del "Factor de la Hora de Máxima Demanda", que es la relación entre el volumen de tránsito en la hora de máxima demanda y la máxima proporción del flujo durante un intervalo de tiempo dentro de esa hora. Este intervalo se considera de cinco minutos para autopistas y de quince minutos para intersecciones. El factor de la hora de máxima demanda en autopistas varía usualmente entre 0.70 y 0.95; en intersecciones el valor del factor varía alrededor de 0.85. Se hace notar que cuando el factor de la hora de máxima demanda se acerca a la unidad (valor máximo), el flujo de tránsito tiende a ser uniforme.

E) Interrupciones en el tránsito. Existen elementos en el camino que con alguna frecuencia pueden interrumpir la circulación del tránsito, afectando el nivel de servicio. Cuando el nivel de servicio es alto, una interrupción momentánea en la circulación del tránsito no será grave. Sin embargo, cuando el volumen de servicio se acerca a la capacidad, la misma interrupción podrá ocasionar que se formen grandes colas, con el consiguiente congestionamiento.

Se han dividido las interrupciones del tránsito en dos grandes categorías: las ocasionadas por intersecciones a nivel y otras interrupciones.

Las intersecciones a nivel constituyen el tipo más común de interrupción y el más difícil de eliminar, ya que implica que dos corrientes de tránsito diferentes tengan que compartir una área común del camino. Su influencia sobre los volúmenes de servicio es tan grande, que en la mayoría de los casos donde existen, gobiernan la determinación de la capacidad y no pueden ser tratadas como ajustes al flujo continuo. Entre las otras interrupciones están las casetas de cobro, puentes levadizos, e

intersecciones a nivel con ferrocarril. Estas interrupciones involucran necesariamente un tiempo de espera del tránsito continuo, originando la formación de colas de vehículos, cuyos efectos pueden repercutir en puntos críticos del camino antes de la interrupción.

6.6 ANALISIS DE CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO EN AUTOPISTAS Y VIAS RAPIDAS

El propósito de las autopistas y vías rápidas es el de proporcionar a los usuarios, un nivel de servicio alto a través del movimiento rápido del tránsito, y de evitar interferencias externas. Esto se logra al eliminar el acceso directo a las propiedades en favor de un servicio sin interrupciones; lo anterior trae generalmente como consecuencia, una gran demanda del usuario por este tipo de caminos.

A continuación se describirán los procedimientos básicos para la determinación de los volúmenes de servicio y las capacidades en tramos de autopistas. Una aplicación directa es aquella en que se tiene como dato la demanda del tránsito, y se ha elegido el nivel de servicio deseado; el problema a resolver consiste en proyectar todos los tramos y características del camino, en concordancia con el nivel establecido.

Si un tramo de la autopista funciona a un nivel más bajo que el nivel de servicio elegido, su influencia puede alcanzar una longitud considerable, por lo que es conveniente que cada tramo guarde el equilibrio apropiado, en relación con todos los demás puntos del camino. Este equilibrio no implica necesariamente velocidades de operación o condiciones idénticas en todo el camino.

Para un nivel de servicio dado, los conductores aceptan velocidades un tanto menores a través de situaciones críticas, tales como pendientes pronunciadas, zonas de entrecruzamiento y enlaces, así como en el cruce de intersecciones a nivel.

Como ya se mencionó con anterioridad, las velocidades de operación y las relaciones volumen de demanda-capacidad o volumen de servicio-capacidad (relaciones v/c), son los factores más apropiados para usarse en la identificación de los niveles de servicio. Estos mismos factores se utilizarán por consiguiente, para el análisis en el caso particular de autopistas y vías rápidas.

En la tabla 6-C se describen los diferentes niveles de servicio en autopistas y vías rápidas, incluyendo los límites de la velocidad de operación y las relaciones v/c tanto para el alineamiento ideal (velocidad de proyecto de 110 km/h) como para el alineamiento restringido (velocidad de proyecto menor de 110 km/h), conjuntamente con los correspondientes volúmenes de servicio máximos y las capacidades para varios carriles bajo condiciones de circulación continua.

6.6.1 Elementos críticos que requieren consideración

Las características de la operación del tránsito y por consiguiente, el proyecto de cada tramo crítico, deberá estar en armonía con el nivel de servicio adoptado como mínimo para todo el camino. Idealmente, esta armonía requerirá que el nivel de servicio sea uniforme en todos los pun-

NIVEL DE SERVICIO	CONDICIONES DEL FLUJO DE TRANSITO		VOLUMEN DE SERVICIO - CAPACIDAD (v/c)º			VOLUMEN DE SERVICIO MAXIMO BAJO CONDICIONES IDEALES, INCLUYENDO VELOCIDAD DE PROYECTO PONDERADA DE 110 km/h (TOTAL DE VEHICULOS LIGEROS POR HORA EN UN SENTIDO)						
	DESCRIPCION	VELOCIDAD DE OPERACION (km/h)	VALOR LIMITE PARA VOLUMEN DE PROYECTO PONDERADA DE 110 km/h	VALOR APROXIMADO PARA CUALQUIER NUMERO DE CARRILES con velocidad de proyecto por debajo de:	4 CARRILES	6 CARRILES	8 CARRILES	PARA CADA CARRIL ADICIONAL A CUATRO CARRILES EN UNA DIRECCION				
A	FLUJO LIBRE	≥ 95	≤ 0.35	95 km/h	1400	2400	3400	1000				
B	FLUJO ESTABLE	≥ 90	≤ 0.50	80 km/h	2000	3500	5000	1500				
FACTOR DE LA HORA DE MAXIMA DEMANDA (FHMD)†												
C	FLUJO ESTABLE	≥ 80	0.75 ≤ FHMD ≤ 0.85	80 km/h	0.77	0.83	0.91	1.00	0.77	0.83	0.91	1.00
D	FLUJO INESTABLE	≥ 65	0.50 ≤ FHMD ≤ 0.75	80 km/h	2.30	2.50	2.70	3.00	3.70	4.00	4.30	4.60
E	FLUJO INESTABLE	50-55	FHMD ≤ 0.50	80 km/h	2.00	3.00	3.50	3.60	4.15	4.50	4.90	5.60
F	FLUJO FORZADO	< 50	FHMD ≤ 1.00	80 km/h	4000	6000	8000	2000				

a) - La velocidad de operación y la relación v/c son medidas independientes del nivel de servicio, ambos límites deben satisfacerse en cualquier determinación del nivel.
 b) - La velocidad de operación requerida para este nivel no se alcanza en algunos tramos.
 c) - El factor de hora de máxima demanda para autopistas es la relación entre el volumen de una hora completa y el valor más alto del flujo que ocurre durante un intervalo de 5 minutos dentro de la hora de máxima demanda.
 d) - Un factor de hora de máxima demanda de uno, por lo tanto, se alcanza, los valores en la tabla deben considerarse como los valores máximos del flujo medio que probablemente se alcanzarán durante el intervalo de máxima demanda de 5 minutos dentro de la hora de máxima demanda.
 e) - Aproximadamente.
 f) - Capacidad.

TABLA 6-C NIVELES DE SERVICIO Y VOLUMENES DE SERVICIO MAXIMOS PARA AUTOPISTAS Y VIAS RAPIDAS BAJO CONDICIONES DE CIRCULACION CONTINUA

tos, lo cual no siempre es posible en la práctica. Lo que debe hacerse es establecer un nivel de servicio promedio, representativo de todo el tramo de camino, de tal manera que cada lugar con niveles de operación críticos, cumpla por lo menos con el nivel de servicio adoptado como mínimo. Esto significa que algunas partes del tramo tendrán niveles de servicio mayores que los puntos donde hay restricciones, aun cuando no necesariamente tan altos, que caigan en una clasificación diferente de nivel de servicio. Las variaciones entre subtramos adyacentes nunca deberán exceder un nivel.

Entre las situaciones comunes, las siguientes son las que requieren análisis y verificación: Incrementos repentinos en la demanda del tránsito (enlaces de entrada o zonas de entrecruzamiento); creación de conflictos intervehiculares dentro de la corriente del tránsito, por cambio en las condiciones del camino (reducción en el número de carriles de tránsito, enlaces de salida, pendientes, zonas de entrecruzamiento); variaciones en la naturaleza de la demanda del tránsito (variación en el porcentaje de camiones); influencias adversas por alineamiento restringido (curvas muy cerradas); y cambios obligatorios en las condiciones de circulación del tránsito (en intersecciones a nivel de vías rápidas).

El mayor problema, después de identificar un lugar con un nivel de servicio por abajo del adoptado, es el de ajustar las condiciones del proyecto, de tal manera que se proporcione al nivel de servicio deseado. Para tal ajuste, la primera consideración debe ser la de que los volúmenes de demanda nunca excedan los volúmenes de servicio correspondientes al nivel de servicio adoptado, si es que ese nivel debe conservarse en todo el tramo.

A) Ancho de carril y distancia a obstáculos laterales. En la tabla 6-D se indican los factores de ajuste que deben ser aplicados para corregir las restricciones causadas por el ancho de carril y la distancia a obstáculos laterales.

Es conveniente señalar que se ha observado que los conductores que usan regularmente una autopista, se ajustan rápidamente a la presencia de obstáculos laterales continuos como puede ser una defensa, lo que ocasiona que los factores de ajuste mostrados en la tabla 6-D, sean excesivos. Cuando se tienen elementos continuos específicamente diseñados para la seguridad del tránsito puede ser conveniente, a criterio, aplicar un ajuste menor.

B) Camiones, autobuses y pendientes. Debido a que los camiones y autobuses son más grandes que los vehículos ligeros, éstos ocupan mayor espacio; de ahí, que siempre deberá considerarse su influencia en los volúmenes de servicio de autopistas.

Desde el punto de vista del volumen de servicio y de la capacidad, el principal criterio para evaluar las pendientes, es su efecto en las características de operación de camiones y autobuses. El efecto que tienen los camiones en un tramo largo de autopista, es diferente del efecto sobre una pendiente específica dentro de ese tramo.

Distancia desde la orilla del carril al obstáculo (en m)	Factor de ajuste, W, por ancho de carril y distancia a obstáculos laterales							
	Obstáculos a un lado de un sentido de circulación				Obstáculos a ambos lados de un sentido de circulación			
	Carriles en metros				Carriles en metros			
	3 65	3 35	3 05	2 75	3 65	3 35	3 05	2 75
Carretera dividida de 4 carriles								
1 80	1 00	0 97	0 91	0 81	1 00	0 97	0 91	0 81
1 20	0 99	0 96	0 90	0 80	0 98	0 95	0 89	0 79
0 60	0 97	0 94	0 88	0 79	0 94	0 91	0 86	0 76
0 00	0 90	0 87	0 82	0 73	0 81	0 79	0 74	0 66
Carretera dividida de 6 y 8 carriles								
1 80	1 00	0 96	0 89	0 78	1 00	0 96	0 89	0 78
1 20	0 99	0 95	0 88	0 77	0 98	0 94	0 87	0 77
0 60	0 97	0 93	0 87	0 76	0 96	0 92	0 85	0 75
0 00	0 94	0 91	0 85	0 74	0 91	0 87	0 81	0 70

TABLA 6-D. EFECTO COMBINADO DEL ANCHO DE CARRIL Y DE LA DISTANCIA A OBSTACULOS LATERALES SOBRE LA CAPACIDAD Y LOS VOLUMENES DE SERVICIO EN AUTOPISTAS Y VIAS RAPIDAS CON CIRCULACION CONTINUA

La tabla 6-E presenta valores medios de la equivalencia de vehículos ligeros por camión en tramos largos de autopistas y vías rápidas para varias condiciones del terreno. Estas se aplican a todos los niveles de servicio, excepto al nivel A, para el cual no son factibles los valores medios. En la misma tabla, se dan las equivalencias aproximadas para autobuses, en aquellos casos donde su volumen es importante.

Estas equivalencias pueden usarse en los análisis de tramos largos de autopistas, que incluyen pendientes y subtramos a nivel, y no deben usarse para los análisis detallados de pendientes específicas.

NIVEL DE SERVICIO	EQUIVALENTE, PARA			
	TERRENO PLANO	TERRENO EN LOMERIO	TERRENO MONTANOSO	
A	Muy variable, a este nivel uno ó más camiones tienen prácticamente la misma influencia sobre el volumen de servicio. Para el análisis, úsense las equivalencias indicadas para los niveles B hasta E.			
B hasta E	E _T Para camiones	2	4	8
	E _B Para autobuses*	1.6	3	5

*- En la mayoría de los análisis no se consideran por separado; aplíquese únicamente cuando el volumen de autobuses sea importante.

TABLA 6-E. VEHICULOS LIGEROS EQUIVALENTES POR CAMION Y POR AUTOBUS PARA TRAMOS LARGOS DE AUTOPISTAS, VIAS RAPIDAS Y CARRETERAS DE CARRILES MULTIPLES

Para el análisis de pendientes específicas sostenidas en autopistas, en la tabla 6-F se indican las equivalencias de vehículos ligeros, las cuales representan el grado en que la capacidad y los volúmenes de servicio pueden ser afectados desfavorablemente.

La eficiencia relativamente buena de los autobuses en la mayoría de las pendientes, conduce a usar una equivalencia general de 1.6. Sin embargo, cuando la pendiente es larga y pronunciada y los volúmenes de autobuses son fuertes, puede ser deseable hacer consideraciones especiales. Para estos casos, en la tabla 6-G se indican las equivalencias de vehículos ligeros por autobús.

PENDIENTE (%)	LONGITUD DE LA PENDIENTE (KM)	EQUIVALENCIA EN VEHICULOS LIGEROS, E _f									
		Niveles de servicio entre A y C para					Niveles de servicio D y E para				
		3% CAMIONES	5% CAMIONES	10% CAMIONES	15% CAMIONES	20% CAMIONES	3% CAMIONES	5% CAMIONES	10% CAMIONES	15% CAMIONES	20% CAMIONES
0-1	TODAS	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	0.4-0.8	5	4	4	3	3	5	4	4	3	3
	1.2-1.6	7	5	5	4	4	7	5	5	4	4
	2.4-3.2	7	6	6	6	6	7	6	6	6	6
	4.8-6.4	7	7	8	8	8	7	7	8	8	8
3	0.4	10	8	5	4	3	10	8	5	4	3
	0.8	10	8	5	4	4	10	8	5	4	4
	1.2	10	8	6	5	5	10	8	5	4	5
	1.6	10	8	6	5	6	10	8	6	5	6
	2.4	10	9	7	7	7	10	8	7	7	7
	3.2	10	9	8	8	8	10	9	8	8	8
4	0.4	12	9	5	4	3	13	9	5	4	3
	0.8	12	9	5	5	5	13	9	5	5	5
	1.2	12	9	7	7	7	13	9	7	7	7
	1.6	12	10	8	8	8	13	10	8	8	8
	2.4	12	11	10	10	10	13	11	10	10	10
	3.2	12	11	11	11	11	13	12	11	11	11
5	0.4	13	10	6	4	3	14	10	6	4	3
	0.8	13	11	7	7	7	14	11	7	7	7
	1.2	13	11	9	8	8	14	11	9	8	8
	1.6	13	12	10	10	10	14	13	10	10	10
	2.4	13	13	12	12	12	14	14	13	13	13
	3.2	13	14	14	14	14	14	15	15	15	15
6	0.4	14	10	6	4	3	15	10	6	4	3
	0.8	14	11	8	8	8	15	11	8	8	8
	1.2	14	12	10	10	10	15	12	10	10	10
	1.6	14	13	12	12	11	15	14	13	13	11
	2.4	14	14	14	14	13	15	16	15	15	14
	3.2	14	15	16	16	15	15	18	18	18	16
7	0.4	14	16	18	18	17	15	20	20	20	19
	0.8	14	16	18	18	17	15	20	20	20	19
	1.2	14	16	18	18	17	15	20	20	20	19
	1.6	14	16	18	18	17	15	20	20	20	19

TABLA 6-F. EQUIVALENCIAS DE VEHICULOS LIGEROS POR CAMION, PARA SUBTRAMOS O PENDIENTES ESPECIFICAS DE AUTOPISTAS, VIAS RAPIDAS Y CARRETERAS DE CARRILES MULTIPLES

PENDIENTE (%)	EQUIVALENCIA EN VEHICULOS LIGEROS ^a E _B	
	Niveles de servicio A, B y C	Niveles de servicio D y E
0-4 ^b	1.6	1.6
5 ^c	4	2
6 ^c	7	4
7 ^c	12	10

a - Para todos los porcentajes de autobuses

b - Todas las longitudes

c - Sólo cuando la longitud de las pendientes sea mayor de 800 m

TABLA 6-G. VEHICULOS LIGEROS EQUIVALENTES POR AUTOBUS EN SUBTRAMOS O PENDIENTES ESPECIFICAS DE AUTOPISTAS, VIAS RAPIDAS Y CARRETERAS DE CARRILES MULTIPLES

En aplicaciones prácticas, las equivalencias por camiones y autobuses de las tablas 6-E, 6-F y 6-G no se usan directamente, sino que son empleadas para elegir el factor de ajuste por camiones apropiado, el cual se obtiene de la tabla 6-H; esta tabla considera la equivalencia de vehículos ligeros y el porcentaje de camiones y autobuses en la corriente del tránsito.

C) Zonas de entrecruzamiento. Usualmente, en una autopista cualquier zona de entrecruzamiento representa un punto crítico que debe analizarse, para determinar su efecto en el tramo de carretera considerado. Aun cuando el flujo de tránsito pueda mantenerse sin interrupciones, las características de la operación en el camino arriba y abajo de la corriente de tránsito, pueden verse afectadas grandemente por condiciones de operación desfavorables en zonas de entrecruzamiento. De lo anterior se desprende que es importante que el proyecto de la zona de entrecruzamiento sea tal, que pueda mantenerse el nivel de servicio adoptado en todos los puntos; esto no significa que exista la misma velocidad en todo el camino.

En el inciso 6-9 se tratará el procedimiento que debe seguirse para el cálculo de volúmenes de servicio y capacidades en zonas de entrecruzamiento.

D) Enlaces. El volumen de tránsito en una autopista o vía rápida cambia en cada enlace de entrada y salida, con las correspondientes variaciones en las condiciones de operación del camino. Debido a que es imposible proyectar un camino en el que los volúmenes de demanda permanezcan constantes, los puntos más críticos por analizar serán aquellos donde los volúmenes son máximos, incluyendo un punto precisamente después de un enlace de entrada y un punto antes de un enlace de salida.

VEHICULOS LIGEROS EQUIVALENTES, E _L ó E _B	FACTOR DE AJUSTE POR CAMIONES T _C ó T _L (B _C ó B _L POR AUTOBUSES ^c)																													
	PORCENTAJE DE CAMIONES, P _T (ó DE AUTOBUSES, P _B) de																													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	45	50	55	60							
2	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.93	0.92	0.91	0.89	0.88	0.86	0.85	0.83	0.80	0.77	0.74	0.71	0.69	0.67	0.65	0.63							
3	0.98	0.96	0.94	0.93	0.91	0.89	0.88	0.86	0.85	0.83	0.81	0.78	0.76	0.74	0.71	0.67	0.63	0.59	0.56	0.53	0.50	0.48	0.45							
4	0.97	0.94	0.92	0.90	0.87	0.85	0.83	0.81	0.79	0.77	0.74	0.70	0.68	0.65	0.63	0.57	0.53	0.49	0.45	0.43	0.40	0.38	0.36							
5	0.96	0.93	0.89	0.86	0.83	0.81	0.78	0.76	0.74	0.71	0.68	0.64	0.61	0.58	0.56	0.50	0.45	0.42	0.38	0.36	0.33	0.31	0.29							
6	0.95	0.91	0.87	0.83	0.80	0.77	0.74	0.71	0.69	0.67	0.63	0.59	0.56	0.53	0.50	0.44	0.40	0.36	0.33	0.31	0.29	0.27	0.25							
7	0.94	0.89	0.85	0.81	0.77	0.74	0.70	0.68	0.65	0.63	0.58	0.54	0.51	0.48	0.45	0.40	0.36	0.32	0.29	0.27	0.25	0.23	0.22							
8	0.93	0.88	0.84	0.80	0.76	0.73	0.70	0.67	0.64	0.61	0.59	0.54	0.51	0.47	0.44	0.38	0.32	0.29	0.26	0.24	0.22	0.21	0.19							
9	0.93	0.86	0.81	0.76	0.71	0.68	0.64	0.61	0.58	0.56	0.51	0.47	0.44	0.41	0.38	0.33	0.29	0.26	0.24	0.22	0.20	0.19	0.17							
10	0.92	0.85	0.79	0.74	0.69	0.65	0.61	0.58	0.55	0.53	0.48	0.44	0.41	0.38	0.36	0.31	0.27	0.24	0.22	0.20	0.18	0.17	0.16							
11	0.91	0.83	0.77	0.71	0.67	0.63	0.59	0.56	0.53	0.50	0.45	0.42	0.38	0.36	0.33	0.29	0.25	0.22	0.20	0.18	0.17	0.15	0.14							
12	0.90	0.82	0.75	0.69	0.65	0.60	0.57	0.53	0.50	0.48	0.43	0.39	0.36	0.34	0.31	0.27	0.23	0.21	0.19	0.17	0.15	0.14	0.13							
13	0.89	0.81	0.74	0.68	0.63	0.58	0.54	0.51	0.48	0.45	0.41	0.37	0.34	0.32	0.29	0.25	0.22	0.19	0.17	0.16	0.14	0.13	0.12							
14	0.88	0.79	0.72	0.66	0.61	0.56	0.52	0.49	0.46	0.43	0.39	0.35	0.32	0.30	0.28	0.24	0.20	0.18	0.16	0.15	0.13	0.12	0.11							
15	0.88	0.78	0.70	0.64	0.59	0.54	0.51	0.47	0.44	0.42	0.37	0.34	0.31	0.28	0.26	0.22	0.19	0.17	0.15	0.14	0.13	0.11	0.10							
16	0.87	0.77	0.69	0.63	0.57	0.53	0.49	0.45	0.43	0.40	0.36	0.32	0.29	0.27	0.25	0.21	0.18	0.16	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10							
17	0.86	0.76	0.68	0.61	0.56	0.51	0.47	0.44	0.41	0.38	0.34	0.31	0.28	0.26	0.22	0.20	0.17	0.15	0.14	0.12	0.11	0.10	0.09							
18	0.85	0.75	0.66	0.60	0.54	0.49	0.46	0.42	0.40	0.37	0.33	0.30	0.27	0.25	0.23	0.19	0.16	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10	0.09							
19	0.85	0.74	0.65	0.59	0.53	0.48	0.44	0.41	0.38	0.36	0.32	0.28	0.26	0.24	0.22	0.18	0.16	0.14	0.13	0.11	0.10	0.09	0.08							
20	0.84	0.73	0.64	0.57	0.51	0.47	0.42	0.40	0.37	0.34	0.30	0.27	0.25	0.23	0.21	0.17	0.15	0.13	0.12	0.10	0.10	0.09	0.08							
22	0.83	0.70	0.61	0.54	0.49	0.44	0.40	0.37	0.35	0.32	0.28	0.25	0.23	0.21	0.19	0.16	0.14	0.12	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07							
24	0.81	0.68	0.59	0.52	0.47	0.42	0.38	0.35	0.33	0.30	0.27	0.24	0.21	0.19	0.16	0.15	0.13	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07	0.07							
26	0.80	0.67	0.57	0.50	0.44	0.40	0.36	0.33	0.31	0.29	0.25	0.22	0.20	0.18	0.17	0.14	0.12	0.10	0.09	0.08	0.07	0.07	0.06							
28	0.79	0.65	0.55	0.48	0.43	0.38	0.35	0.32	0.29	0.27	0.24	0.21	0.19	0.17	0.16	0.13	0.11	0.10	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06							
30	0.78	0.63	0.53	0.46	0.41	0.36	0.33	0.30	0.28	0.26	0.22	0.20	0.18	0.16	0.15	0.12	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05							
35	0.75	0.60	0.49	0.42	0.37	0.33	0.30	0.27	0.25	0.23	0.20	0.17	0.16	0.14	0.13	0.11	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05							
40	0.72	0.56	0.46	0.39	0.34	0.30	0.27	0.24	0.22	0.20	0.18	0.15	0.14	0.12	0.11	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04							
45	0.69	0.53	0.43	0.36	0.31	0.27	0.25	0.22	0.20	0.19	0.16	0.14	0.12	0.11	0.10	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04							
50	0.67	0.51	0.40	0.34	0.29	0.25	0.23	0.20	0.18	0.17	0.15	0.13	0.11	0.10	0.09	0.08	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03							
55	0.65	0.48	0.38	0.32	0.27	0.24	0.21	0.19	0.17	0.16	0.13	0.12	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03							
60	0.63	0.46	0.36	0.30	0.25	0.22	0.19	0.17	0.16	0.15	0.12	0.11	0.10	0.09	0.08	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02							
65	0.61	0.44	0.34	0.28	0.23	0.20	0.18	0.16	0.15	0.14	0.12	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03							
70	0.59	0.42	0.33	0.27	0.22	0.19	0.17	0.15	0.14	0.13	0.11	0.09	0.08	0.07	0.07	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02							
75	0.57	0.40	0.31	0.25	0.21	0.18	0.16	0.14	0.13	0.12	0.10	0.09	0.08	0.07	0.07	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02							
80	0.55	0.39	0.30	0.24	0.20	0.17	0.15	0.14	0.12	0.11	0.10	0.08	0.07	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02							
90	0.53	0.36	0.27	0.22	0.18	0.16	0.14	0.12	0.11	0.10	0.09	0.07	0.07	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02							
100	0.50	0.34	0.25	0.20	0.17	0.14	0.13	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02							

- a - De las tablas 7 E ó 7 F y 7 G
- b - Calculados con la fórmula $100/(100 - P_T + E_T P_T)$, o bien $100/(100 - P_B + E_B P_B)$ Aplíquese esta fórmula para otros porcentajes
- c - Cuando la proporción de autobuses sea importante, úsese una equivalencia para camiones y otra para autobuses obteniendo factores de ajuste independientes

TABLA 6-H FACTORES DE AJUSTE POR CAMIONES Y AUTOBUSES EN AUTOPISTAS, CARRETERAS DE CARRILES MÚLTIPLES Y CARRETERAS DE DOS CARRILES

Las condiciones de operación de los enlaces de entrada y salida, serán analizados con mayor detalle en el inciso 6.10 de este capítulo.

E) Interrupciones del tránsito (intersecciones a nivel) Las intersecciones a nivel, por la misma categoría del proyecto, son inadmisibles en autopistas donde los accesos deben ser totalmente controlados; sin embargo, bajo ciertas condiciones pueden admitirse en algunas vías rápidas, y es esta característica la que diferencia fundamentalmente a las autopistas de las vías rápidas. El análisis de capacidad en los accesos de intersecciones controladas con semáforos será discutido en el inciso 6.11 de este capítulo.

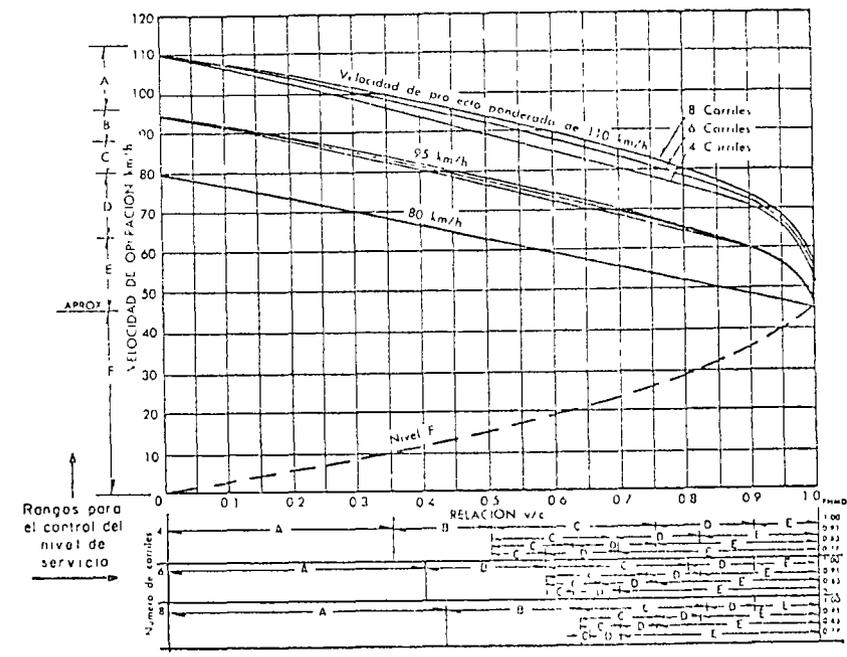


FIGURA 6.20. RELACIONES ENTRE LA VELOCIDAD DE OPERACION Y LA RELACION V/C, EN AUTOPISTAS Y VIAS RAPIDAS, BAJO CONDICIONES DE CIRCULACION CONTINUA

6.6.2 Procedimientos para determinar la capacidad y los niveles de servicio

El primer paso a dar, dentro del procedimiento general para cualquier tipo de camino, consiste en dividir el camino en estudio en subtramos que presenten condiciones razonablemente uniformes, desde el punto de vista de la capacidad. Generalmente en el caso de autopistas modernas esta división no es necesaria, puesto que estos caminos están proyectados con altas especificaciones en tramos relativamente largos, especialmente en áreas rurales. El análisis por subtramos será necesario sólo cuando se presente un enlace, una zona de entrecruzamiento, una pendiente significativa o alguna otra característica especial del camino.

Como ya se mencionó con anterioridad, la velocidad de operación y la relación volumen de demanda-capacidad (relación v/c) son las medidas básicas usadas para determinar el nivel de servicio en autopistas y vías rápidas. Las limitaciones que definen los diferentes niveles de servicio, están resumidas en la tabla 6-C, la cual sirve de base para la mayoría de los cálculos.

La Figura 6.20 presenta gráficamente estas relaciones básicas; aunque esta figura es similar en apariencia al esquema de velocidad de operación-volumen de la Figura 6.10-C, el volumen en el eje de las abscisas está substituido por la relación volumen de servicio o de demanda-capacidad. De ahí, que puede ser aplicada a cualquier autopista o vía rápida con cualquier número de carriles, pudiendo determinarse la capacidad; independientemente de que las condiciones asociadas sean o no ideales. Ocasionalmente,

aquellos problemas que involucren interpolación pueden ser manejados mejor con la figura que con la tabla 6-C.

La determinación de la capacidad en autopistas con condiciones por abajo de las ideales, requiere de la simple aplicación de uno o más de los factores de ajuste al valor básico (bajo condiciones ideales) de 2 000 vehículos ligeros por carril por hora, multiplicado por el número de carriles (valor tabulado para el nivel E en la tabla 6-C). El cálculo de volúmenes de servicio requiere además, del uso de las relaciones velocidad de operación-relación v/c , de la tabla 6-C.

A) Cálculo de la capacidad bajo condiciones prevaletientes. La fórmula básica para calcular la capacidad en caminos con circulación continua, donde no hay elementos que restrinjan la circulación, tales como enlaces, entrecruzamientos o semáforos, es:

Capacidad

$$c = 2\,000 N \frac{v}{c} W T_c$$

en la cual:

c = Capacidad (tránsito mixto en vehículos por hora en un sentido).

N = Número de carriles (en un sentido).

$\frac{v}{c}$ = Relación volumen-capacidad (para este caso $\frac{v}{c} = 1$).

W = Factor de ajuste por ancho de carril y distancia a obstáculos laterales, obtenido de la tabla 6-D.

T_c = Factor de ajuste a la capacidad, por vehículos pesados.

Para tramos largos: úsese la tabla 6-E en combinación con la tabla 6-H.

Para subtramos específicos: úsese la tabla 6-F en combinación con la tabla 6-H.

Cuando el volumen de autobuses sea importante, el segundo término de la fórmula básica anterior deberá multiplicarse por el factor de autobuses (B_c), obtenido de la tabla 6-H en combinación con la tabla 6-G.

B) Cálculo del volumen de servicio. El procedimiento es similar al descrito previamente para la capacidad, pero en este caso la relación v/c debe aplicarse para el nivel de servicio deseado y el factor de ajuste por camiones debe ser el correspondiente al nivel de servicio, en lugar del utilizado para la capacidad. Cuando no se dispone del alineamiento ideal, o sea que la velocidad de proyecto es inferior a 110 km/h, debe usarse la relación v/c indicada en la tabla 6-C para la velocidad de proyecto ponderada correspondiente, lo cual asegurará un resultado que mantendrá la velocidad

de operación, dentro del nivel de servicio deseado. La relación v/c también se puede obtener de la Figura 6.20, entrando con la velocidad de operación correspondiente al nivel de servicio deseado, e intersectando la curva de la velocidad de proyecto ponderada. En los niveles de servicio C y D, la elección de la relación v/c involucra la consideración del factor de la hora de máxima demanda como multiplicador.

$$VS = 2\,000 N \frac{v}{c} W T_L$$

en la cual:

VS = Volumen de servicio (tránsito mixto en vehículos por hora en un sentido).

N = Número de carriles (en un sentido).

$\frac{v}{c}$ = Relación volumen-capacidad, obtenida de la tabla 6-C (o Figura 6.20).

W = Factor de ajuste por ancho de carril y distancia a obstáculos laterales, obtenido de la tabla 6-D.

T_L = Factor de ajuste a un nivel de servicio dado, por vehículos pesados.

Para tramos largos: úsese la tabla 6-E en combinación con la tabla 6-H.

Para subtramos específicos: úsese la tabla 6-F en combinación con la tabla 6-H.

Cuando el volumen de autobuses sea importante, el segundo término de la fórmula básica anterior deberá multiplicarse por el factor de autobuses (B_c), obtenido de la tabla 6-H en combinación con la tabla 6-G.

C) Determinación de niveles de servicio. La determinación del nivel de servicio que proporciona una autopista o vía rápida existente o propuesta, al acomodar un volumen de demanda dado, bajo condiciones de circulación continua, es a menudo el problema que se presenta. Esto puede hacerse directamente examinando la tabla 6-C, si se conocen la velocidad de operación, el volumen de demanda, el factor de la hora de máxima demanda y la velocidad de proyecto ponderada. El resultado será aproximado si se desprecia la influencia de los vehículos pesados. Sin embargo, un cálculo preciso en el que se consideren los vehículos pesados y las características de la hora de máxima demanda, involucra complicaciones que hacen inevitable una solución por tanteos. Un procedimiento de análisis puede ser el siguiente:

1. Supóngase un nivel de servicio a criterio, tomando en cuenta las características del camino y del tránsito.

2. Calcúlese el volumen de servicio correspondiente al nivel de servicio supuesto, siguiendo el procedimiento indicado para cálculo de volúmenes de servicio.

3. Compárese el volumen de servicio obtenido con el volumen de demanda en el camino. Dos tanteos como máximo, permitirán conocer en qué rango de volúmenes de servicio cae el volumen de demanda y por consiguiente, conocer el nivel de servicio buscado.

6.6.3 Solución de ejemplos típicos

Ejemplo 1.

A. Datos:

Autopista de 8 carriles, 4 en cada sentido.

Carriles de 3.65 m, acotamientos de 1.80 m o más y distancia libre lateral a la barrera central de 0.60 m.

Terreno en lomerío.

Camiones 6%; autobuses despreciable.

Los alineamientos horizontal y vertical restringen la velocidad de proyecto ponderada a 80 km/h.

Factor de la hora de máxima demanda = 0.91.

B. Determinése:

1. Volúmenes de servicio para los niveles de servicio B y D.

2. Volúmenes de servicio para los niveles B y D para las condiciones dadas, si los alineamientos permiten una velocidad de proyecto ponderada de 95 km/h.

C. Solución:

1. Volúmenes de servicio para los niveles B y D (velocidad de proyecto ponderada de 80 km/h).

a) En la tabla 6-C se observa que el nivel de servicio B no puede alcanzarse, debido a que la velocidad de proyecto ponderada de 80 km/h no permite alcanzar la velocidad de operación de 90 km/h, correspondiente al nivel de servicio B.

b) Volumen de servicio para el nivel D:

$$VS_D = 2000 N \frac{v}{c} W T_L$$

$$N = 4 \text{ carriles}$$

$$\frac{v}{c} = 0.45 \times FHMD \text{ (tabla 6-C)}$$

$W = 0.98$ (en la tabla 6-D se encontró un valor de 0.97 considerando un obstáculo a 0.60 m a un lado de un sentido de circulación. Como el obstáculo es continuo a todo lo largo del camino, este valor se incrementó a 0.98)

$$T_L = 0.85 \text{ (tabla 6-E en combinación con la tabla 6-H)}$$

Substituyendo:

$$VS_D = 2000 \times 4 (0.45 \times 0.91) \times 0.98 \times 0.85$$

$$VS_D = 2729 \text{ vph}$$

2. Volumen de servicio para los niveles B y D (velocidad de proyecto ponderada de 95 km/h).

a) Volumen de servicio para el nivel B.

$$VS_B = 2000 N \frac{v}{c} W T_L$$

N, W, T_L son los mismos valores (solución 1b)

$$\frac{v}{c} = 0.25 \text{ (de la tabla 6-C)}$$

Substituyendo:

$$VS_B = 2000 \times 4 \times 0.25 \times 0.98 \times 0.85$$

$$VS_B = 1666 \text{ vph}$$

b) Volumen de servicio para el nivel D.

$$VS_D = 2000 N \frac{v}{c} W T_L$$

N, W, T_L son los mismos valores anteriores

$$\frac{v}{c} = 0.80 \text{ FHMD (de la tabla 6-C)}$$

Substituyendo:

$$VS_D = 2000 \times 4 \times (0.80 \times 0.91) \times 0.98 \times 0.85$$

$$VS_D = 4851 \text{ vph.}$$

Ejemplo 2.

A. Datos:

Autopista de 6 carriles, 3 en cada sentido.

Carriles de 3.65 m, acotamientos de 3.00 m y distancias a obstáculos laterales mayores de 1.80 m.

Pendiente longitud del 4% en 2.4 km.

Alineamiento para una velocidad de proyecto ponderada de 110 km/h.

Camiones 18%.

Autobuses 10%.

Factor de la hora de máxima demanda = 0.77.

Para el año actual, existe un volumen de demanda de 1100 vph en un sentido.

Para dentro de quince años, se estima un volumen de demanda de 2150 vph.

B. Determínese:

1. Si el tramo opera actualmente a un nivel de servicio C, con las características geométricas y el volumen de demanda indicado.

2. Si el tramo operará dentro de quince años a un nivel de servicio E (capacidad), sin modificar las características geométricas y con el volumen de demanda estimado para ese año.

C. Solución:

1. Revisión para el nivel de servicio C en las condiciones actuales.

$$VS_C = 2000 N \frac{v}{c} W T_L B_L$$

$$N = 3 \text{ carriles}$$

$$\frac{v}{c} = 0.80 \times FHMN \text{ (de la tabla 6-C).}$$

$$W = 1.0 \text{ (de la tabla 6-D).}$$

$$E_T = 10 \text{ (de la tabla 6-F).}$$

$$T_L = 0.38 \text{ (de la tabla 6-H).}$$

$$E_B = 1.6 \text{ (de la tabla 6-G).}$$

$$B_L = 0.94 \text{ [de la fórmula } 100/(100 - P_B + E_B P_B)\text{].}$$

Substituyendo:

$$VS_C = 2,000 \times 3 \times (0.80 \times 0.77) \times 1.0 \times 0.38 \times 0.94$$

$$VS_C = 1,320 \text{ vph.}$$

Comparando con el volumen de demanda actual.

$$1,100 \text{ vph (volumen actual)} < 1,320 (VS_C)$$

Conclusión:

El tramo de la pendiente específica de la autopista opera al nivel de servicio C, en la actualidad.

2. Revisión para el nivel de servicio E (capacidad) dentro de quince años.

$$VS_E = 2000 N \frac{v}{c} W T_C B_C$$

N y W son los mismos valores que para la primera parte del problema:
T_C y B_C son iguales a T_L y B_L

$$\frac{v}{c} = 1.0 \text{ al nivel de servicio E (capacidad)}$$

Substituyendo.

$$VS_E = 2000 \times 3 \times 1.0 \times 1.0 \times 0.38 \times 0.94$$

$$VS_E = 2,143 \text{ vph}$$

Comparado con el volumen de demanda dentro de quince años 2,150 vph
(volumen futuro) \approx 2,143 vph (VS_E).

Conclusión:

El tramo de la pendiente específica de la autopista operará a la capacidad dentro de quince años.

6.7 ANALISIS DE CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO EN CARRETERAS DE CARRILES MULTIPLES

La diferencia en la operación entre las autopistas y las vías rápidas con los caminos de carriles múltiples, se debe a la ausencia de la faja separadora central y del control de acceso. En efecto, cuando se tienen dos o más carriles en una dirección, a volúmenes intermedios, la eficiencia de las autopistas es mayor que la de los caminos con carriles múltiples, debido a que en estos últimos caminos, los vehículos que circulan por los carriles interiores se ven afectados por los vehículos que circulan en sentido contrario, además de las interferencias producidas por los vehículos que van a dar vuelta o vienen de la izquierda y a que los vehículos que circulan por los carriles exteriores se ven afectados en mayor proporción por el tránsito lento y por los obstáculos laterales a la derecha. Como consecuencia de lo anterior, para fines de análisis se considera que las velocidades de operación son más bajas en caminos de carriles múltiples que en las autopistas, lo cual produce diferencias en los límites de la relación v/c para ciertos niveles de servicio.

Las condiciones ideales para caminos de carriles múltiples son similares a las de las autopistas, incluyendo carriles de 3.65 m, distancias a obstáculos laterales mayores de 1.80 m, alineamientos para velocidad de proyecto de 110 km/h, y sin vehículos pesados en la corriente de tránsito. Las capacidades promedio por carril bajo estas condiciones son también de 2,000 vehículos ligeros por hora.

Bajo condiciones de volúmenes de servicio correspondientes a los niveles C y D, los factores de la hora de máxima demanda no se aplican en este tipo de caminos, por considerar que su influencia no se traduce en restricciones indebidas, demoras o probabilidad de interrupción del flujo de tránsito.

En la tabla 6-I se muestran las relaciones que existen entre los niveles de servicio, las velocidades de operación y las relaciones v/c en caminos de carriles múltiples, tanto para condiciones ideales como para el caso de alineamiento restringido (velocidad de proyecto ponderada menor de 110 km/h); en esta tabla se muestran también los volúmenes de servicio y la capacidad bajo condiciones ideales.

6.7.1 Elementos críticos que requieren consideración

Los valores máximos que se dan en la tabla 6-I, casi nunca pueden usarse directamente. Muchos caminos son incapaces de proporcionar el nivel A, y

NIVEL DE SERVICIO	CONDICIONES DEL FLUJO DE TRANSITO		VOLUMEN DE SERVICIO - CAPACIDAD (v/c)		VOLUMEN DE SERVICIO MAXIMO BAJO CONDICIONES IDEALES, INCLUYENDO VELOCIDAD DE PROYECTO PONDERADA DE 110 km/h (Total de vehiculos ligeros por hora, en un sentido)				
	DESCRIPCION	VELOCIDAD DE OPERACION ^a (Km/h)	VALOR LIMITE ^d PARA VELOCIDAD DE PROYECTO PONDERADA DE 110 km/h	VALOR APROXIMADO PARA UNA VELOCIDAD DE PROYECTO PONDERADA DE 80 km/h	95 km/h	80 km/h	CARRETERA DE 4 CARRILES (3 CARRILES POR SENTIDO POR SENTIDO)	CARRETERA DE 6 CARRILES (3 CARRILES ADICIONAL)	CADA CARRIL ADICIONAL
A	FLUJO LIBRE	≥ 95	≤ 0 30	— b	— b	— b	1200	1800	600
B	FLUJO ESTABLE (Velocidad superior del rango)	≥ 90	≤ 0 50	≤ 0 20	— b	— b	2000	3000	1000
C	FLUJO ESTABLE	≥ 70	≤ 0 75	≤ 0 50	≤ 0 25	≤ 0 25	3000	4500	1500
D	APROXIMANDOSE AL FLUJO INESTABLE	≥ 55	≤ 0 90	≤ 0 85	≤ 0 70	≤ 0 70	3600	5400	1800
E ^c	FLUJO INESTABLE	50 ^d		≤ 1 00			4000	6000	2000
F	FLUJO FORZADO	< 50 ^d							MUY VARIABLE (Desde cero hasta la capacidad)

a - La velocidad de operación y la relación v/c son medidas independientes del nivel de servicio, ambos límites deben satisfacerse en cualquier determinación del nivel.
b - La velocidad de operación requerida pero este nivel no se alcanza aún o bajos volúmenes.
c - Capacidad.
d - Aproximadamente.
e - La relación volumen de demanda-capacidad puede exceder el valor de 1.00 indicando que hay sobrecarga.

TABLA 6-I. NIVELES DE SERVICIO Y VOLUMENES DE SERVICIO MÁXIMOS PARA CARRETERAS DE CARRILES MÚLTIPLES, BAJO CONDICIONES DE CIRCULACION CONTINUA

DISTANCIA DESDE LA ORILLA DEL CARRIL AL OBSTACULO (m)	FACTOR DE AJUSTE ^a , W POR ANCHO DE CARRIL Y DISTANCIA A OBSTACULOS LATERALES							
	Obstáculos en el lado derecho (Considerando que circula tráfego en sentido contrario del lado izquierdo)				Obstáculos a ambos lados de un sentido de circulación ^{b,c}			
	CARRILES EN METROS				CARRILES EN METROS			
	3.65	3.35	3.05	2.75	3.65	3.35	3.05	2.75
Carretera no dividida de 4 carriles								
1.80	1.00	0.95	0.89	0.77	NA	NA	NA	NA
1.20	0.98	0.94	0.88	0.76	NA	NA	NA	NA
0.60	0.95	0.92	0.86	0.75	0.94	0.91	0.86	NA
0.00	0.88	0.85	0.80	0.70	0.81	0.79	0.74	0.66
Carretera no dividida de 6 y 8 carriles								
1.80	1.00	0.95	0.89	0.77	NA	NA	NA	NA
1.20	0.99	0.94	0.88	0.76	NA	NA	NA	NA
0.60	0.97	0.93	0.86	0.75	0.96	0.92	0.85	NA
0.00	0.94	0.90	0.83	0.72	0.91	0.87	0.81	0.70

a - Los mismos valores de ajuste para la capacidad y niveles de servicio.
b - Su uso es apropiado sólo cuando el camino no dividido este separado temporalmente en calzadas, por obstáculos tales como barreras centrales, elementos estructurales de pasos a desnivel, más cercanos de lo que estaría el tránsito opuesto.
c - N/A - no aplicable, úsese el ajuste para obstáculos en el lado derecho.

aun el nivel B no se alcanza en buen número de ellos. En los procedimientos de cálculo que siguen, el efecto adverso del alineamiento está implícito en la restricción de la velocidad de proyecto ponderada, en tanto que las otras restricciones, se toman en cuenta a través de los factores de ajuste correspondientes.

Además de los elementos considerados por medio de factores de ajuste, existen otros a lo largo de caminos de carriles múltiples, los cuales pueden afectar desfavorablemente, cuando se desea proporcionar un servicio uniforme en todo el camino. Estos elementos incluyen zonas de entrecruzamiento, enlaces, intersecciones a nivel, desarrollo de actividades comerciales en la zona adyacente, y una variedad de interrupciones potenciales del tránsito.

A) Ancho del carril y distancia a obstáculos laterales. En la tabla 6-J se presentan los factores de ajuste combinados, por ancho de carril y distancia a obstáculos laterales. Normalmente, las restricciones laterales en este tipo de caminos, serán más críticas y más abruptas por naturaleza, que las que normalmente se encuentran en autopistas. Sin embargo, en caso de existir obstrucciones continuas, deberán considerarse las mismas precauciones que para el caso de autopistas. En la tabla 6-J los ajustes por obstáculos en el lado derecho consideran el efecto del tránsito en sentido contrario. Los ajustes por obstáculos en ambos lados deberán usarse únicamente cuando el camino no dividido, esté separado temporalmente en dos calzadas por obstáculos, tales como barreras centrales, elementos estruc-

TABLA 6-J. EFECTO COMBINADO DEL ANCHO DE CARRIL Y DE LA DISTANCIA A OBSTACULOS LATERALES SOBRE LA CAPACIDAD Y LOS VOLUMENES DE SERVICIO EN CARRETERAS DE CARRILES MÚLTIPLES CON CIRCULACION CONTINUA

turales de pasos a desnivel y obstrucciones similares, más cercanos que lo que podría estar el tránsito en sentido contrario.

B) Camiones, autobuses y pendientes. Aun cuando probablemente existan diferencias pequeñas entre el efecto específico sobre autopistas y el efecto sobre carreteras de carriles múltiples, el resultado de las investigaciones disponibles no justifica tomar en cuenta tales refinamientos; es decir, que la tabla 6-H de factores de ajuste utilizados para autopistas, son aplicables en el caso de caminos de carriles múltiples.

C) Zonas de entrecruzamiento. Aun cuando las zonas de entrecruzamiento están por lo común asociadas al proyecto de autopistas, existen muchos casos en donde se utilizan zonas de entrecruzamiento en caminos sin control de acceso, o donde ocurre el entrecruzamiento aun sin haber sido proyectado. En el caso de zonas de entrecruzamiento en las glorietas, el análisis puede hacerse siguiendo los procedimientos indicados en el inciso 6.9 de este capítulo; sin embargo, otros casos como son los entrecruzamientos formados por el tránsito que entra y sale por calles transversales, requieren de especial consideración.

D) Enlaces. En el inciso 6.10 se trata lo relativo al análisis de las condiciones de operación en los enlaces; sin embargo, los procedimientos descritos son aplicables principalmente a los enlaces utilizados en autopistas de accesos controlados.

E) Interrupciones del tránsito. Por definición todos los caminos, excepto las autopistas, están sujetas a interrupciones, aun cuando la magnitud de éstas puede variar ampliamente.

Las interrupciones fijas del tránsito en el camino incluyen las intersecciones controladas con semáforos, señales de alto, cruces a nivel de ferrocarril, y otras interrupciones semejantes. Aun en condiciones de flujo libre se requiere que todos los vehículos se detengan ante una señal de alto y muchos otros tendrán que detenerse con las otras interrupciones. Estas interrupciones o disminución de velocidad, crean condiciones de operación diferentes. A lo largo del camino otros muchos elementos, tales como el desarrollo de actividades comerciales, pueden producir interferencias adicionales.

De las interrupciones anteriores, la ocasionada por el control de semáforos es la única para la cual se proporcionan los procedimientos de análisis, para hacer una evaluación cuantitativa de su efecto en la capacidad y en los niveles de servicio del camino. En cuanto al resto de las interrupciones, no se dispone hasta el momento de investigación suficiente, como para definir numéricamente su efecto en la calidad de la operación en el camino.

6.7.2 Procedimientos para determinar la capacidad y los niveles de servicio

Los procedimientos generales tratados en el inciso 6.6 correspondiente a autopistas, son igualmente aplicables a la mayoría de los caminos. De manera similar, el procedimiento consiste en determinar las capacidades, volúmenes de servicio y niveles de servicio, de subtramos específicos, analizando después tramos de mayor longitud, formados por la combinación de varios subtramos.

Como en el caso de autopistas, la velocidad de operación y la relación volumen de demanda o de servicio-capacidad (relación v/c) son las medidas

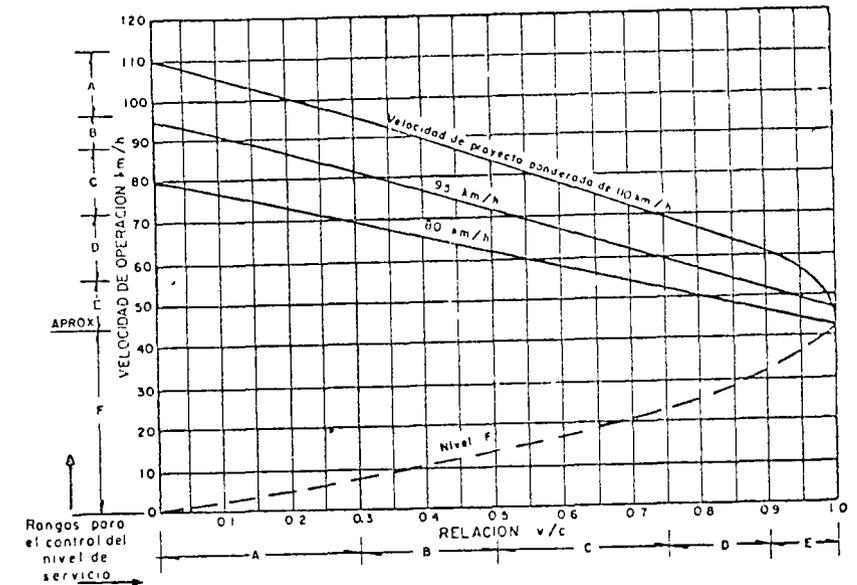


FIGURA 6.21. RELACIONES ENTRE LA VELOCIDAD DE OPERACION Y LA RELACION V/C, EN CARRETERAS DE CARRILES MULTIPLES, BAJO CONDICIONES DE CIRCULACION CONTINUA

básicas utilizadas para identificar los niveles de servicio, en caminos de carriles múltiples. En la tabla 6-I se indican estos valores, en tanto que en la Figura 6.21 se muestran gráficamente estas mismas relaciones. Esta figura es de gran utilidad en problemas donde se requiere interpolación o cuando es necesario un análisis visual rápido, o una verificación de resultados.

Los procedimientos para la determinación de la capacidad, el volumen de servicio y el nivel de servicio, son idénticos a los utilizados en autopistas.

A) Cálculo de la capacidad bajo condiciones prevalecientes. El cálculo se hace empleando la fórmula básica para circulación continua.

$$\text{Capacidad } c = 2000 \frac{v}{c} W T_C$$

En la cual:

c = Capacidad (tránsito mixto en vehículos por hora en un sentido).
 N = Número de carriles (en un sentido).

$\frac{v}{c}$ = Relación volumen-capacidad (para este caso $\frac{v}{c} = 1$).

W = Factor de ajuste por ancho de carril y distancia a obstáculos laterales, obtenido en la tabla 6-J.

T_C = Factor de ajuste a la capacidad, por vehículos pesados.

Para tramos largos: Use la tabla 6-E en combinación con la tabla 6-H.

Para subtramos específicos: Use la tabla 6-F en combinación con la tabla 6-H.

Cuando el volumen de autobuses sea importante, el segundo término de la fórmula básica anterior deberá multiplicarse por el factor de autobuses B_C obtenido de la tabla 6-H en combinación con la tabla 6-G.

B) Determinación de niveles de servicio. Los mismos pasos sugeridos para la determinación del nivel de servicio en autopistas indicado en el inciso 6.6, pueden seguirse en el caso de carreteras de carriles múltiples, a saber:

1. Supóngase un nivel de servicio a criterio, tomando en cuenta las características del camino y del tránsito.

2. Calcúlese el volumen de servicio correspondiente al nivel de servicio supuesto, siguiendo el procedimiento indicado para el cálculo de volúmenes de servicio.

3. Compárese el volumen de servicio obtenido, con el volumen de demanda en el camino. Dos tanteos como máximo permitirán conocer en qué rango de volúmenes de servicio cae el volumen de demanda y, por consiguiente, conocer el nivel de servicio buscado.

6.7.3 Solución de ejemplos típicos

Ejemplo 1.

A. Datos:

Carretera de 4 carriles, 2 en cada sentido.

Carriles de 3.65 m.

Arboles a una distancia de 1.20 m de la orilla de la calzada.

Pendiente longitudinal del 3% en 1.6 km.

Camiones 7%; autobuses, despreciable.

Alineamiento para una velocidad de proyecto ponderada de 95 km.

Volumen de demanda 540 vph.

B. Determinése:

1. El nivel de servicio para el volumen de demanda indicado en los datos.

2. El volumen de servicio correspondiente al nivel de servicio E (capacidad).

C. Solución:

1. Se supone como primer tanteo, un nivel de servicio C.

$$VS_C = 2000 N \frac{v}{c} W T_L$$

$N = 2$ carriles.

$\frac{v}{c} = 0.50$ (de la tabla 6-I).

$W = 0.98$ (de la tabla 6-J).

$E_T = 7$ (de la tabla 6-F).

$T_L = 0.70$ (de la tabla 6-H).

Substituyendo:

$$VS_C = 2000 \times 2 \times 0.50 \times 0.98 \times 0.70$$

$$VS_C = 1372 \text{ vph}$$

Comparando con el volumen de demanda:

$$540 \text{ vph} < 1372 (VS_C).$$

Como la diferencia entre el volumen de servicio para el nivel C y el volumen de demanda, es grande, se supone para un segundo tanteo un nivel de servicio B.

$$VS_B = 2000 N \frac{v}{c} W T_L$$

N , W y T_L son los mismos valores que para el nivel C.

$$\frac{v}{c} = 0.20 \text{ (de la tabla 6-I).}$$

Substituyendo:

$$VS_B = 2000 \times 2 \times 0.20 \times 0.98 \times 0.70$$

$$VS_B = 549 \text{ vph}$$

Comparando con el volumen de demanda:

$$540 \text{ vph} \doteq 549 \text{ vph.}$$

Conclusión:

El camino opera al nivel de servicio B.

2. Volumen de servicio E (capacidad):

$$VS_E = 2000 N \frac{v}{c} W T_C$$

N y W son los mismos valores que para la primera parte del problema; T_C es igual a T_L .

$$\frac{v}{c} = 1.0 \text{ al nivel de servicio E (capacidad).}$$

Substituyendo:

$$VS_E = 2000 \times 2 \times 1.0 \times 0.98 \times 0.70$$

$$VS_E = 2744 \text{ vph}$$

Ejemplo 2.

A. Datos:

En un tramo de camino de 4 carriles, 2 en cada sentido, se han determinado las capacidades de varios subtramos, conociéndose, además, los volúmenes de demanda y las velocidades de operación en cada uno de ellos. Las relaciones v/c , las velocidades de operación y las longitudes de cada subtramo, son las siguientes:

Subtramo	Tipo de terreno	Longitud (km)	$\frac{v}{c}$	Velocidad de operación
a	Plano en tangente	3	0.45	98
b	Sinuoso en lomerío	6	0.50	93
c	Montañoso	5	0.66	68
d	Sinuoso en lomerío	5	0.55	84
e	Lomerío en tangente	3	0.45	97

B. Determinése:

El nivel de servicio medio que proporciona todo el tramo.

C. Solución:

1. Promedio ponderado de la relación $\frac{v}{c}$

$$\begin{array}{r}
 0.45 \times 3 = 1.35 \\
 0.50 \times 6 = 3.00 \\
 0.66 \times 5 = 3.30 \\
 0.55 \times 5 = 2.75 \\
 0.45 \times 3 = 1.35 \\
 \hline
 22 \quad 11.75
 \end{array}$$

$$\text{Promedio ponderado de la relación} = \frac{11.75}{22} = 0.53$$

$$\frac{v}{c} \text{ para el nivel de servicio B} = 0.50 \text{ (de la tabla 6-I)}$$

$$\frac{v}{c} \text{ para el nivel de servicio C} = 0.75 \text{ (de la tabla 6-I)}$$

Por la relación v/c , el valor queda dentro del rango correspondiente al nivel de servicio C, casi en el límite con el nivel B.

2. Promedio ponderado de la velocidad de operación.

$$\begin{array}{r}
 98 \times 3 = 294 \\
 93 \times 6 = 558 \\
 68 \times 5 = 340 \\
 84 \times 5 = 420 \\
 97 \times 3 = 291 \\
 \hline
 22 \quad 1903
 \end{array}$$

$$\text{Velocidad de operación ponderada} = \frac{1903}{22} = 87 \text{ km/h.}$$

Por velocidad de operación, el tramo queda dentro del rango correspondiente al nivel de servicio C (véase tabla 6-I).

Conclusión:

Como los promedios ponderados de la relación v/c y la velocidad de operación se mantienen dentro de los rangos del nivel de servicio C, pero muy cercano a los límites con el nivel de servicio B, se considera que el nivel de servicio medio que proporciona todo el tramo es muy cercano al B.

6.8 ANALISIS DE CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO EN CARRETERAS DE DOS CARRILES

Dos características básicas distinguen la operación del tránsito en caminos de dos carriles y la operación del tránsito en caminos de carriles múltiples: primera, la distribución del tránsito por sentidos en caminos de dos carriles, no tiene efecto prácticamente en las condiciones de operación a cualquier nivel de volúmenes de tránsito; por consiguiente, la capacidad y los volúmenes de servicio en caminos de dos carriles se expresan en total de vehículos por hora, independientemente de la distribución del tránsito por sentidos. Segunda, las maniobras de rebase se efectúan en el carril que normalmente ocupa el tránsito en sentido contrario.

Debido a que en caminos de este tipo, el volumen de tránsito asociado con la geometría del camino, establecen la distancia de visibilidad de rebase disponible, estos elementos tienen un efecto más marcado en las velocidades de operación, que en el caso de camino de carriles múltiples. De ahí que, siempre que se consideran volúmenes de servicio para caminos de dos carriles, debe considerarse también la distancia de visibilidad de rebase disponible (500 m o más).

En caminos de primer orden con circulación continua, un incremento en el volumen produce un efecto desfavorable, reduciendo las velocidades de operación aun a volúmenes bajos, y aun en el caso de que se disponga de suficiente distancia de visibilidad de rebase en todo el tramo. En caminos de segundo orden, este efecto es menos pronunciado, pero sólo porque las características propias del proyecto no permiten altas velocidades aun a volúmenes bajos.

La restricción en la distancia de visibilidad de rebase afecta a la operación en los caminos de dos carriles, de la manera siguiente:

A volúmenes iguales, un camino con distancia de visibilidad de rebase restringida, proporciona velocidades de operación menores de uno sin restricciones en el rebase; asimismo, para mantener las mismas velocidades de operación cuando el rebase está restringido, se requiere de volúmenes de servicio más bajos.

En caminos de dos carriles, el nivel de servicio se expresa de la misma manera que en los casos anteriores, es decir, en términos de la velocidad de operación y de la relación v/c . Para un nivel de servicio dado, las velocidades de operación se mantienen dentro del rango correspondiente a ese nivel, por lo que el efecto de las restricciones en la distancia de visibilidad de rebase, es el de disminuir el volumen de servicio correspondiente. El alineamiento cuando es menor que el ideal (velocidad de proyecto menor de 110 km/h), produce también el mismo efecto, además de restringir o eliminar totalmente la posibilidad de alcanzar niveles de servicio más altos.

En la tabla 6-K se indica la escala de características de operación, establecida para los diferentes niveles de servicio en caminos de dos carriles. Además de las velocidades de operación y de las relaciones volumen-capacidad para condiciones de alineamiento ideal, se incluyen también los valores de la influencia que sobre las relaciones v/c tiene la distancia de visibilidad de rebase (expresada como porcentaje de la longitud total del tramo, en que esta distancia es mayor de 500 m) y las velocidades de proyecto menores de 110 km/h.

6.8.1 Elementos críticos que requieren consideración

A) Ancho de carril y distancia a obstáculos laterales. En la tabla 6-L se dan los factores de ajuste que reflejan el efecto combinado que tienen las restricciones en el ancho de carril y los obstáculos laterales, sobre caminos de dos carriles.

B) Camiones, autobuses y pendientes. En la tabla 6-M se dan las equivalencias de vehículos ligeros por camión, aplicables a tramos largos de caminos de dos carriles para varias condiciones del terreno y del nivel de servicio; en esta tabla se incluyen también las equivalencias de vehículos ligeros por autobús, las cuales deberán usarse únicamente, cuando el porcentaje de este tipo de vehículos en la corriente de tránsito, sea importante.

Los factores de ajuste para convertir volúmenes de demanda mixtos a vehículos ligeros equivalentes por hora, se obtienen entrando a la tabla 6-H con los equivalentes de la tabla 6-M y el porcentaje de camiones o autobuses en la corriente de tránsito.

Para el análisis de subtramos o pendientes específicos, el procedimiento es más selectivo, debiendo en tal caso usarse las tablas 6-N.1, 6-N.2 y 6-N.3, en las que se indican las equivalencias de vehículos ligeros por camión, a la capacidad y a los diferentes niveles de servicio, así como las pendientes y sus longitudes; los factores de ajuste se obtienen de la tabla 6-H, entrando con la equivalencia antes mencionada y con el porcentaje de camiones correspondiente.

NIVEL DE SERVICIO	CONDICIONES DEL FLUJO DE TRANSITO		DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE REBASE > 500 mts (%)	VOLUMEN DE SERVICIO - CAPACIDAD					VOLUMEN DE SERVICIO MAXIMO BAJO CONDICIONES IDEALES, INCLUIDO VELOCIDAD DE PROYECTO PORCENTAJE DE VELOCIDADES LIGEROS POR HORA EN AMBAS DIRECCIONES)	
	DESCRIPCION	VELOCIDAD DE OPERACION (Km/h)		VALOR LIMITE PARA VELOCIDAD DE PROYECTO PONDERADA DE 110 km/h	VALOR PARA UNA VELOCIDAD DE PROYECTO PONDERADA DEL					
					95 Km/h	80 Km/h	70 Km/h	65 Km/h		55 Km/h
A	FLUJO LIBRE	> 95	≤	—	—	—	—	—	400	
			100	0.20	—	—	—	—		
			80	0.18	—	—	—	—		
			60	0.15	—	—	—	—		
			40	0.12	—	—	—	—		
			20	0.08	—	—	—	—		
B	FLUJO ESTABLE (Velocidad superior del rango)	> 80	≤	—	—	—	—	900		
			100	0.45	0.40	—	—		—	
			80	0.42	0.35	—	—		—	
			60	0.38	0.30	—	—		—	
			40	0.34	0.24	—	—		—	
			20	0.30	0.18	—	—		—	
C	FLUJO ESTABLE	> 65	≤	—	—	—	—	1400		
			100	0.70	0.66	0.56	0.51		—	
			80	0.68	0.61	0.53	0.46		—	
			60	0.65	0.56	0.47	0.41		—	
			40	0.62	0.51	0.38	0.32		—	
			20	0.59	0.45	0.28	0.22		—	
D	FLUJO PROXIMO A LA INESTABLE	> 55	≤	—	—	—	—	1700		
			100	0.85	0.83	0.75	0.67		0.58	
			80	0.84	0.81	0.72	0.62		0.55	
			60	0.83	0.79	0.69	0.57		0.51	
			40	0.82	0.76	0.66	0.52		0.45	
			20	0.81	0.71	0.61	0.44		0.35	
E ^c	FLUJO INESTABLE	50 ^d	NO ES APLICABLE ^e	≤ 1.00					2000	
			NO ES APLICABLE ^e	NO SIGNIFICATIVO ^f						
F	FLUJO FORZADO	< 50 ^d	NO ES APLICABLE ^e	NO SIGNIFICATIVO ^f					MUY VARIABLE (Desde cero hasta la capacidad)	

- a - La velocidad de operación y la relación v/c son medidas independientes del nivel de servicio, ambos límites deben satisfacerse en cualquier determinación del nivel.
- b - Cuando el espacio este en blanco, la velocidad de operación requerida para este nivel es inalcanzable aún a volúmenes bajos.
- c - Capacidad.
- d - Aproximadamente.
- e - No hay rebase.
- f - La relación volumen de demanda-capacidad puede exceder el valor de 1.00 indicando que hay sobrecarga.

TABLA 6-K. NIVELES DE SERVICIO Y VOLUMENES DE SERVICIO MAXIMOS PARA CARRETERAS DE DOS CARRILES BAJO CONDICIONES DE FLUJO CONTINUO

DISTANCIA DESDE LA ORILLA DEL CARRIL AL OBSTACULO (m)	FACTORES DE AJUSTE ^a W _L Y W _C POR ANCHO DE CARRIL Y DISTANCIA A OBSTACULOS LATERALES		OBSTACULO EN AMBOS LADOS ^b																	
	OBSTACULO EN UN SOLO LADO ^b		CARRILES EN METROS																	
			3 65		3 35		3 05		2 75		3 65		3 35		3 05		2 75			
	NIVEL		NIVEL		NIVEL		NIVEL		NIVEL		NIVEL		NIVEL		NIVEL		NIVEL			
B		E ^c		B		E ^c		B		E ^c		B		E ^c		B		E ^c		
1 80	1 00	1 00	0 86	0 88	0 77	0 81	0 70	0 76	1 00	1 00	0 86	0 88	0 77	0 81	0 70	0 76	1 00	1 00	0 86	0 88
1 20	0 96	0 97	0 83	0 85	0 74	0 79	0 68	0 74	0 92	0 94	0 79	0 83	0 71	0 76	0 65	0 71	0 96	0 97	0 83	0 85
0 60	0 91	0 93	0 78	0 81	0 70	0 75	0 64	0 70	0 81	0 85	0 70	0 75	0 63	0 69	0 57	0 65	0 91	0 93	0 78	0 81
0 00	0 85	0 88	0 73	0 77	0 66	0 71	0 60	0 66	0 70	0 76	0 60	0 67	0 54	0 62	0 49	0 58	0 85	0 88	0 73	0 77

a - Factores de ajuste, W_C para el nivel "E" (Capacidad) y W_L para nivel "B", interpolar para otros niveles
 b - Incluye el efecto del tránsito en sentido contrario
 c - Capacidad

TABLA 6-L. EFECTO COMBINADO DEL ANCHO DE CARRIL Y DE LA DISTANCIA A OBSTACULOS LATERALES SOBRE LA CAPACIDAD Y LOS VOLUMENES DE SERVICIO EN CARRETERAS DE DOS CARRILES BAJO CONDICIONES DE CIRCULACION CONTINUA

EQUIVALENTE	NIVEL DE SERVICIO	EQUIVALENTE, PARA:		
		TERRENO PLANO	TERRENO EN LOMERIO	TERRENO MONTAÑOSO
E _T , PARA CAMIONES	A	3	4	7
	B y C	2 5	5	10
	D y E	2	5	12
E _B PARA AUTOBUSES ^a	Todos los Niveles	2	4	6

a - Hacer consideraciones por separado no es requisito en la mayoría de los problemas, aplíquese únicamente cuando el volumen de autobuses sea significativo.

TABLA 6-M. VEHICULOS LIGEROS EQUIVALENTES POR CAMION Y POR AUTOBUS EN TRAMOS LARGOS DE CARRETERAS DE DOS CARRILES

PENDIENTE ^a (%)	EQUIVALENCIA EN VEHICULOS LIGEROS, ^b E _B		
	Niveles de servicio A y B	Nivel de servicio C	Niveles de servicio D y E (capacidad)
0 - 4	2	2	2
5 ^c	4	3	2
6 ^c	7	6	4
7 ^c	12	12	10

a - Todas las longitudes
 b - Para todos los porcentajes de autobuses
 c - Solo cuando la longitud de las pendientes, sea mayor de 800 m

TABLA 6-O. VEHICULOS LIGEROS EQUIVALENTES POR AUTOBUS EN SUBTRAMOS O PENDIENTES ESPECIFICAS DE CARRETERAS DE DOS CARRILES

PENDIENTE (%)	LONGITUD DE LA PENDIENTE (Km)	VEHICULOS LIGEROS EQUIVALENTES (Para todos los Porcentajes de Camiones)								
		PESO POTENCIA = 90 kg/HP			PESO POTENCIA = 120 kg/HP			PESO POTENCIA = 180 kg/HP		
		NIVEL DE SERVICIO A/B	NIVEL DE SERVICIO C	NIVEL DE SERVICIO D/E	NIVEL DE SERVICIO A/B	NIVEL DE SERVICIO C	NIVEL DE SERVICIO D/E	NIVEL DE SERVICIO A/B	NIVEL DE SERVICIO C	NIVEL DE SERVICIO D/E
0 - 1	TODOS	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1 - 2	TODOS	2	2	2	2	2	2			
2	0 400							6	4	2
	0 800							6	5	2
	1 200							8	7	2
	1 600							8	8	4
	2 400							9	9	6
	3 200							10	10	7
	4 800							11	11	8
3	0 400	4	2	2	5	4	2	7	7	2
	0 800	4	2	2	6	5	2	11	11	8
	1 200	4	2	2	7	6	2	14	14	13
	1 600	5	3	2	8	7	3	16	16	15
	2 400	5	3	2	9	8	4	17	21	21
	3 200	5	3	2	10	9	5	18	22	22
	4 800	5	3	2	10	9	5	19	24	24
4	0 400	6	4	2	7	6	2	11	11	8
	0 800	7	6	2	10	10	7	18	22	22
	1 200	7	7	2	12	12	10	22	28	29
	1 600	7	7	2	13	13	12	24	31	34
	2 400	8	8	3	14	14	14	25	34	37
	3 200	8	8	4	15	15	15	26	35	39
	4 800	8	8	5	16	16	16	27	36	40
5	0 400	8	8	5	16	16	16	27	36	40
	0 400	7	7	2	10	10	7	16	19	19
	0 800	10	10	7	15	17	17	26	35	39
	1 200	11	11	9	17	20	20	30	41	46
	1 600	12	12	10	18	23	23	32	45	50
	2 400	13	13	11	19	25	25	34	47	54
	3 200	13	13	12	20	26	26	34	47	54
6	4 800	14	14	12	20	26	27	35	48	55
	0 400	10	10	7	15	17	16	24	31	34
	0 800	14	14	13	21	27	29	34	47	54
	1 200	15	16	15	23	30	32	39	54	64
	1 600	16	17	17	24	32	34	41	58	67
	2 400	17	18	18	25	34	36	44	60	72
	3 200	17	19	19	26	35	37	45	61	73
7	4 800	18	20	21	26	35	38	46	62	74
	0 400	14	14	14	20	25	27	31	44	49
	0 800	18	23	23	27	38	42	44	61	74
	1 200	19	25	26	29	40	45	47	65	79
	1 600	20	26	27	30	42	47	49	68	83
	2 400	21	27	28	31	43	48	51	70	86
	3 200	22	28	29	32	44	49	51	71	87
8	4 800	22	28	30	32	45	50	52	72	88
	0 400	18	22	22	25	34	37	41	58	67
	0 800	22	29	31	33	45	51	52	72	88
	1 200	24	32	34	35	49	55	57	77	97
	1 600	25	33	35	36	50	57	59	80	100
	2 400	25	34	36	37	51	58	61	84	104
	3 200	26	35	37	38	52	59	61	84	105
8	4 800	26	35	38	39	52	60	62	85	106
	6 400	26	35	38	38	52	60	62	85	106

TABLA 6-N VEHICULOS LIGEROS EQUIVALENTES POR CAMION, PARA SUBTRAMOS O PENDIENTES ESPECIFICAS DE CARRETERAS DE DOS CARRILES

Cuando el porcentaje de autobuses sea importante, el factor de ajuste se obtendrá de la tabla 6-H, entrando con las equivalencias de la tabla 6-O.

C) Enlaces. Muchos de los enlaces en entronques tipo diamante, tienen extremos de entrada y salida que conectan con caminos secundarios de dos carriles. Estos extremos, cuando están controlados por semáforos, funcionan del mismo modo que las intersecciones de calles, debiendo por consiguiente, analizarse como intersecciones simples, siguiendo los procedimientos indicados en el inciso 6.11.

Cuando se presenten enlaces que conecten con caminos de dos carriles, el análisis deberá hacerse con los métodos que se dan en el inciso 6.10, correspondiente a vías de enlace. El hecho de que no puedan fijarse capacidades por carril en caminos de dos carriles, hará necesario que se hagan ciertas consideraciones, tomando en cuenta la distribución del tránsito por sentidos.

D) Interrupciones en el tránsito. Como en el caso de caminos de carriles múltiples, las interrupciones del tránsito tienen un efecto negativo en la operación de caminos de dos carriles y deben, por lo tanto, tomarse en consideración en el análisis. Una intersección aislada controlada con semáforos, podrá en muchos casos no afectar materialmente los niveles de servicio más altos, debido a que sólo unos cuantos vehículos tendrán que detenerse en la intersección y porque la capacidad de la intersección excederá considerablemente a los volúmenes de servicio asociados con dichos niveles. Cuando los volúmenes son más grandes, o las intersecciones están ubicadas muy cerca una de la otra, el efecto puede llegar a ser de importancia.

En caminos de dos carriles, las interrupciones del tránsito debidas a paradas momentáneas, descomposturas, accidentes y otras interrupciones semejantes, tienen un efecto mucho mayor en la operación que el que podrían tener incidentes similares en caminos de carriles múltiples, debido a que es mayor la probabilidad de un bloqueo completo de una de ambas direcciones de la corriente de tránsito. El efecto total de cualquiera de estas interrupciones, que son de breve duración y ocurren diariamente, está incluido en los valores que se han presentado para el análisis del nivel de servicio. Las consecuencias de un bloqueo total deberán considerarse seriamente, al balancear las ventajas de un proyecto de dos carriles contra las de uno de cuatro carriles, especialmente cuando la diferencia entre las ventajas es pequeña.

6.8.2 Procedimientos para determinar la capacidad y los niveles de servicio

En caminos de dos carriles, la relación volumen de servicio de demanda-capacidad permanece como medida básica, la cual se relaciona con la velocidad de operación y el nivel de servicio correspondiente. Debido a la influencia del porcentaje de distancia de visibilidad para rebase disponible, y al amplio rango de posibles velocidades de proyecto, la tabla 6-K es más compleja que las tablas utilizadas para autopistas y caminos de carriles múltiples. En este caso, la representación gráfica es muy útil; sin embargo, no es posible usar una sola gráfica para los cálculos, siendo necesaria una serie de gráficas, en las que se combinan la relación volumen de servicio o demanda-capacidad con la velocidad de operación para las diferentes velocidades de proyecto ponderadas; estas gráficas se muestran en las Figuras 6.22 a 6.27.

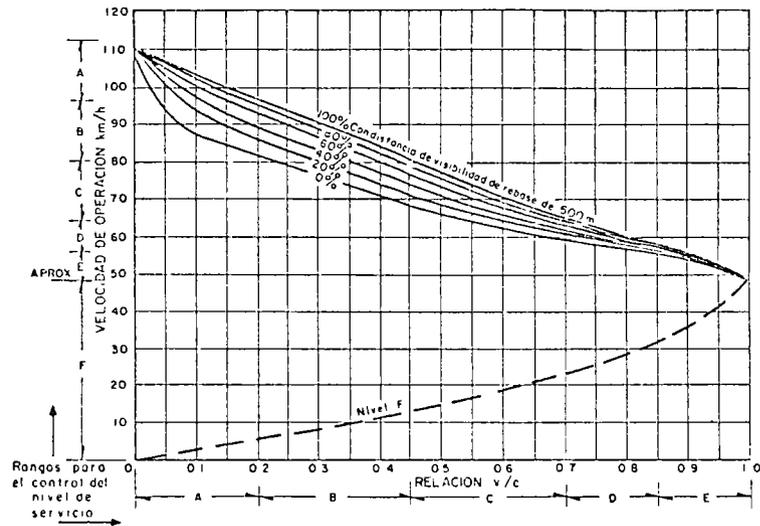


FIGURA 6.22. RELACIONES ENTRE LA VELOCIDAD DE OPERACION Y LA RELACION V/C, PARA AMBOS SENTIDOS DE CIRCULACION EN CARRETERAS DE DOS CARRILES CON VELOCIDAD DE PROYECTO PONDERADA DE 110 KM/H, BAJO CONDICIONES DE CIRCULACION CONTINUA

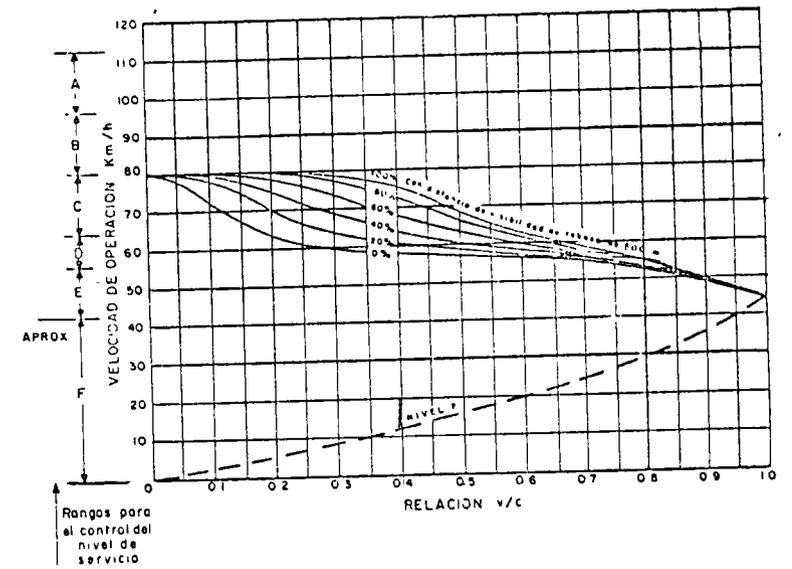


FIGURA 6.24. RELACIONES ENTRE LA VELOCIDAD DE OPERACION Y LA RELACION V/C, PARA AMBOS SENTIDOS DE CIRCULACION EN CARRETERAS DE DOS CARRILES CON VELOCIDAD DE PROYECTO PONDERADA DE 80 KM/H, BAJO CONDICIONES DE CIRCULACION CONTINUA

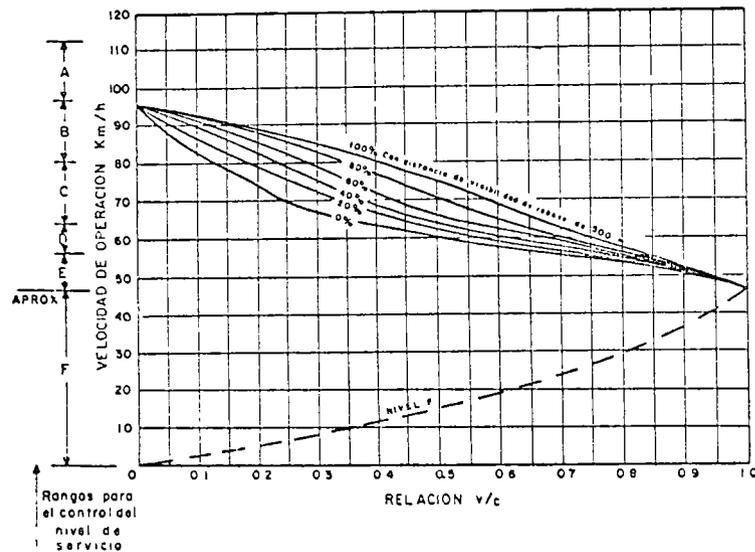


FIGURA 6.23. RELACIONES ENTRE LA VELOCIDAD DE OPERACION Y LA RELACION V/C, PARA AMBOS SENTIDOS DE CIRCULACION EN CARRETERAS DE DOS CARRILES CON VELOCIDAD DE PROYECTO PONDERADA DE 95 KM/H, BAJO CONDICIONES DE CIRCULACION CONTINUA

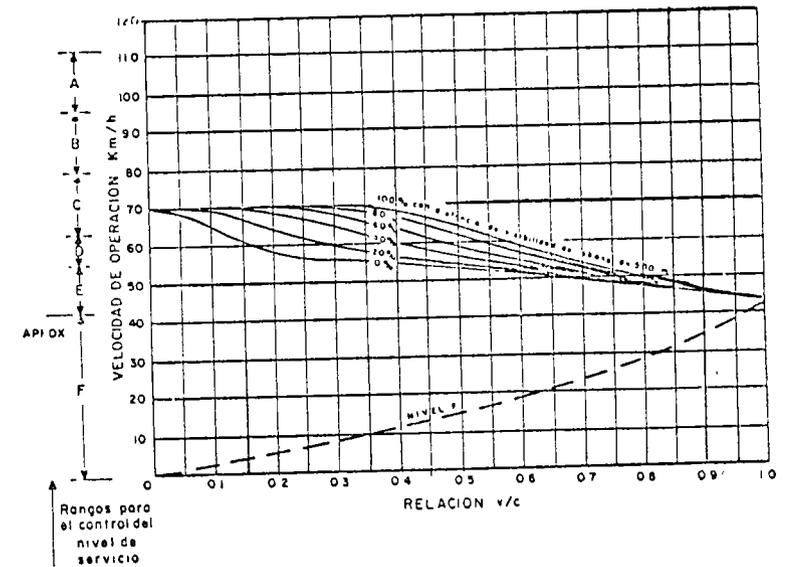


FIGURA 6.25. RELACIONES ENTRE LA VELOCIDAD DE OPERACION Y LA RELACION V/C, PARA AMBOS SENTIDOS DE CIRCULACION EN CARRETERAS DE DOS CARRILES CON VELOCIDAD DE PROYECTO PONDERADA DE 70 KM/H, BAJO CONDICIONES DE CIRCULACION CONTINUA

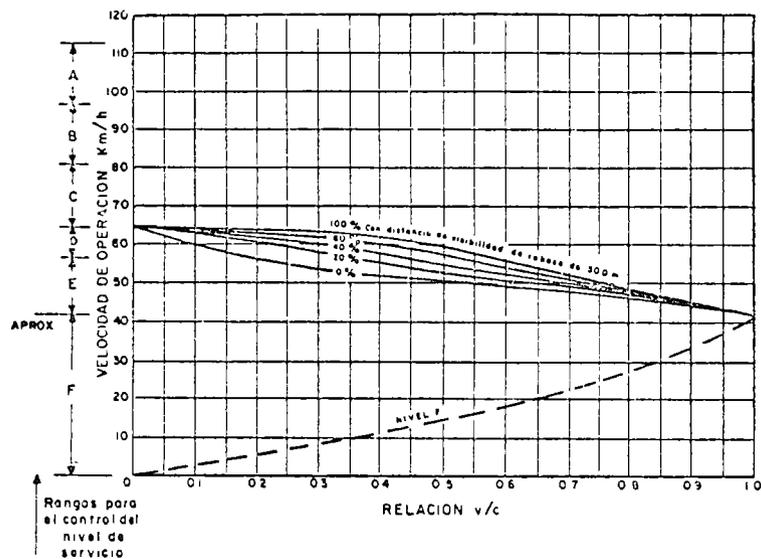


FIGURA 6.26. RELACIONES ENTRE LA VELOCIDAD DE OPERACION Y LA RELACION V/C, PARA AMBOS SENTIDOS DE CIRCULACION EN CARRETERAS DE DOS CARRILES CON VELOCIDAD DE PROYECTO PONDERADA DE 65 KM/H, BAJO CONDICIONES DE CIRCULACION CONTINUA

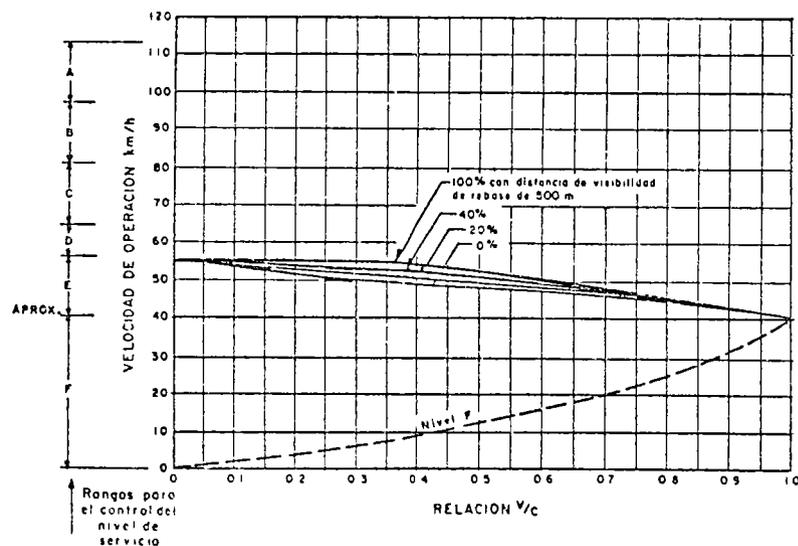


FIGURA 6.27. RELACIONES ENTRE LA VELOCIDAD DE OPERACION Y LA RELACION V/C, PARA AMBOS SENTIDOS DE CIRCULACION EN CARRETERAS DE DOS CARRILES CON VELOCIDAD DE PROYECTO PONDERADA DE 55 KM/H, BAJO CONDICIONES DE CIRCULACION CONTINUA

Cada una de las gráficas representa una velocidad de proyecto ponderada incluyendo, además, un amplio rango de porcentajes de la distancia de visibilidad para rebase disponible. Por consiguiente, la velocidad de proyecto ponderada es el control que se usa para elegir la gráfica apropiada, en un problema específico.

En la Figura 6.22 se muestran los valores básicos de la relación v/c y de las velocidades de operación que establecen los límites de los diferentes niveles de servicio; esta gráfica incluye la curva para condiciones ideales. En el resto de las gráficas, solamente se muestran los valores de la velocidad de operación, ya que éste es el control utilizado. Debe notarse que el valor que se muestra para el límite aproximado del nivel de servicio E, varía de gráfica a gráfica; pudiendo ser más o menos 40 km/h, bajo las peores condiciones de alineamiento.

Los procedimientos para determinar la capacidad y los niveles de servicio, son similares en concepto, a los utilizados para caminos de carriles múltiples. Sin embargo, son un poco más complejos los que involucran el análisis de los niveles de servicio, debido a la influencia de la distancia de visibilidad de rebase disponible y a la mayor probabilidad de tener alineamientos restringidos. Igualmente, existe más variación entre los factores de ajuste para la capacidad y para los niveles de servicio.

Los procedimientos son los siguientes:

A) Cálculo de la capacidad bajo condiciones prevalecientes:

$$\text{Capacidad } c = 2\,000 N \frac{v}{c} W_C T'_C$$

En la cual:

c = Capacidad (tránsito mixto en vehículos por hora, en ambos sentidos).

N = Número de carriles (en este caso $N = 1$, debido a que la capacidad bajo condiciones ideales es de 2 000 vph en ambos sentidos).

$\frac{v}{c}$ = Relación volumen-capacidad (para este caso $\frac{v}{c} = 1$).

W_C = Factor de ajuste a la capacidad, por ancho de carril y distancia a obstáculos laterales, de la tabla 6-I.

T'_C = Factor de ajuste a la capacidad, por vehículos pesados.

Para tramos largos: úsese la tabla 6-M en combinación con la 6-H. Para subtramos específicos: úsese la tabla 6-N en combinación con la 6-H.

Cuando el volumen de autobuses sea importante, el segundo término de la fórmula básica anterior deberá multiplicarse por el factor de autobuses (B_C) obtenido de la tabla 6-H en combinación con la tabla 6-O.

B) Cálculo del volumen de servicio. El procedimiento es similar al empleado para autopistas y caminos de carriles múltiples, excepto que en este caso interviene el porcentaje de distancia de visibilidad de rebase disponible.

$$VS = 2\,000 N \frac{v}{c} W_L T_L$$

En la cual:

VS = Volumen de servicio (tránsito mixto en vehículos por hora, en ambos sentidos).

N = Número de carriles (en este caso $N = 1$, debido a que la capacidad bajo condiciones ideales es de 2 000 vph en ambos sentidos).

$\frac{v}{c}$ = Relación volumen-capacidad (obtenida de la tabla 6-K o Figuras 6.22 a 6.27).

W_L = Factor de ajuste a un nivel de servicio dado, por ancho de carril y distancia a obstáculos laterales, obtenido de la tabla 6-L.

T_L = Factor de ajuste a un nivel de servicio dado, por vehículos pesados.

Para tramos largos: úsease la tabla 6-M en combinación con la tabla 6-H.

Para subtramos específicos: úsease la tabla 6-N en combinación con la tabla 6-H.

Cuando el volumen de autobuses sea importante, el segundo término de la fórmula básica anterior deberá multiplicarse por el factor de autobuses (B_L), obtenido de la tabla 6-H en combinación con la tabla 6-O.

C) Determinación de niveles de servicio. Se sugiere la siguiente secuela:

1. Supóngase un nivel de servicio a criterio, tomando en cuenta las características del camino y del tránsito.

2. Calcúlese el volumen de servicio correspondiente al nivel de servicio supuesto, siguiendo el procedimiento indicado para el cálculo de volúmenes de servicio.

3. Compárese el volumen de servicio obtenido, con el volumen de demanda en el camino. Dos tanteos como máximo, permitirán conocer en qué rango de volúmenes de servicio cae el volumen de demanda y por consiguiente, conocer el nivel de servicio buscado.

D) Solución de ejemplos típicos.

Ejemplo 1.

A. Datos:

Carreteras de dos carriles en dos sentidos.

Ancho de la calzada = 6.10 m.

Acotamiento de 0.60 m en ambos lados.

Terreno en lomerío.

Velocidad de proyecto ponderada, 80 km/h.
 Distancia de visibilidad de rebase disponible mayor de 500 m = 40%.
 Camiones, 20%.
 Autobuses, despreciable.
 Volumen de demanda actual, 250 vph.
 Volumen de demanda dentro de veinte años = 750 vph.

B. Determinése:

1. A qué nivel de servicio opera actualmente.
2. A qué nivel de servicio operará dentro de veinte años.
3. A qué nivel de servicio operará dentro de veinte años si se hacen las siguientes mejoras al camino.

a) 7.30 m de calzada

b) 3.00 m de acotamientos

c) 80% de distancia de visibilidad de rebase disponible.

4. Cuál será el volumen de servicio proporcionado por el camino, mejorado al nivel de servicio E (capacidad).

C. Solución:

1. Se supone como primer tanteo un nivel de servicio C.

$$VS_C = 2\,000 N \frac{v}{c} W_L T_L$$

$$N = 1.$$

$$\frac{v}{c} = 0.38 \text{ (de la tabla 6-K).}$$

$$W_L = 0.65 \text{ (de la tabla 6-L).}$$

$$T_L = 0.56 \text{ (de la tabla 6-H en combinación con la tabla 6-M).}$$

Substituyendo:

$$VS_C = 2\,000 \times 1.0 \times 0.38 \times 0.65 \times 0.56$$

$$VS_C = 276 \text{ vph}$$

Comparando con el volumen de demanda actual:

$$250 \text{ vhp} < 276 \text{ vph (} VS_C \text{)}$$

Conclusión:

La suposición es correcta y el camino opera a un nivel de servicio C.

2. Se supone como primer tanteo un nivel de servicio D.

$$VS_D = 2\,000 N \frac{v}{c} W_L T_L$$

$$N = 1.$$

$$\frac{v}{c} = 0.66 \text{ (de la tabla 6-K).}$$

$$W_L = 0.67 \text{ (de la tabla 6-L).}$$

$$T_L = 0.56 \text{ (de la tabla 6-H en combinación con la tabla 6-M).}$$

Substituyendo:

$$VS_D = 2000 \times 1.0 \times 0.66 \times 0.67 \times 0.56$$

$$VS_D = 493 \text{ vph}$$

Comparando con el volumen de demanda dentro de veinte años

$$750 \text{ vph} > 493 \text{ vph (VS}_D\text{)}$$

Conclusión:

Dentro de veinte años, el volumen de demanda sobrepasará al volumen de servicio correspondiente al nivel D y, por lo tanto, el camino operará a la capacidad o al nivel de servicio F.

3. Se supone como primer tanteo un nivel de servicio C.

$$VS_C = 2000 N \frac{v}{c} W_L T_L$$

$$N = 1.$$

$$\frac{v}{c} = 0.53 \text{ (de la tabla 6-K)}$$

$$W_L = 1.00 \text{ (de la tabla 6-L).}$$

$$T_L = 0.56 \text{ (de la tabla 6-H en combinación con la tabla 6-M)}$$

Substituyendo:

$$VS_C = 2000 \times 1.0 \times 0.53 \times 1.0 \times 0.56$$

$$VS_C = 594 \text{ vph}$$

Comparando con el volumen de demanda dentro de veinte años.

$$750 \text{ vph} > 594 \text{ vph (VS}_C\text{)}$$

Conclusión:

La suposición es incorrecta, por lo que hay que hacer un nuevo tanteo. Se supone un nivel de servicio D.

$$VS_D = 2000 N \frac{v}{c} W_L T_L$$

$$N = 1$$

$$\frac{v}{c} = 0.72 \text{ (de la tabla 6-K)}$$

W_L y T_L son los mismos valores que para el nivel de servicio C

Substituyendo:

$$VS_D = 2000 \times 1.0 \times 0.72 \times 1.0 \times 0.56$$

$$VS_D = 806 \text{ vph}$$

Comparando con el volumen de demanda dentro de veinte años

$$750 \text{ vph} < 806 \text{ vph (VS}_D\text{)}$$

Conclusión:

El camino mejorado operará a un nivel de servicio D dentro de veinte años.

4. Capacidad de la carretera mejorada:

$$c = 2000 N \frac{v}{c} W_C T_C$$

$$N = 1$$

$$\frac{v}{c} = 1.0$$

$$W_C = 1.0 \text{ (de la tabla 6-L)}$$

$$T_C = 0.56 \text{ (de la tabla 6-H en combinación con la tabla 6-M).}$$

Substituyendo:

$$c = 2000 \times 1.0 \times 1.0 \times 1.0 \times 0.56$$

$$c = 1120 \text{ vph}$$

Ejemplo 2.

A. Datos:

Carretera de 2 carriles en dos sentidos.

Carriles de 3.05 m.

Sin acotamientos.

Distancia a obstáculos laterales 0.60 m por un lado y libre de obstáculos por el otro.

Pendiente longitudinal del 5%, en un subtramo de 2400 m.

Alineamiento restringido para una velocidad de proyecto ponderada de 80 km/h.

Distancia de visibilidad de rebase disponible, mayor de 500 m = 40%.

Composición del tránsito: camiones 7% (70% de 2 ejes, 20% de 3 ejes y 10% de 4 ejes o más), autobuses 3%, vehículos ligeros 90%.

Volumen de demanda = 410 vph.

B. Determinese:

El nivel de servicio del subtramo para las condiciones dadas.

C. Solución:

Se supone como primer tanteo un nivel de servicio C.

$$VS_C = 2000 N \frac{v}{c} W_L T_L B_L$$

$$N = 1.$$

$$\frac{v}{c} = 0.38 \text{ (de la tabla 6-K).}$$

$$W_L = 0.71 \text{ (de la tabla 6-L).}$$

Para encontrar una equivalencia media que sea representativa de la composición del tránsito, se ponderan las equivalencias de las tablas 6-N.1, 6-N.2 y 6-N.3.

$$E_T = 13 \times 0.70 = 9.1$$

$$E_T = 25 \times 0.20 = 5.0$$

$$E_T = 47 \times 0.10 = 4.7$$

$$\frac{18.8}{3} = 6.27 \approx 6.3$$

$$T_L = 0.44 \text{ (de la tabla 6-H).}$$

$$E_B = 3 \text{ (de la tabla 6-O)}$$

$$B_L = 0.94 \text{ (de la tabla 6-H).}$$

Substituyendo:

$$VS_C = 2000 \times 1.0 \times 0.39 \times 0.71 \times 0.44 \times 0.94$$

$$VS_C = 223 \text{ vph}$$

Comparando con el volumen de demanda:

$$410 \text{ vph} > 223 \text{ vph (} VS_C \text{)}$$

Se supone como segundo tanteo un nivel de servicio D.

$$VS_D = 2000 N \frac{v}{c} W_L T_L B_L$$

$$N = 1.$$

$$\frac{v}{c} = 0.66 \text{ (de la tabla 6-K).}$$

$$W_L = 0.71 \text{ (de la tabla 6-L).}$$

Procediendo de la misma manera que para el primer tanteo.

$$E_T = 11 \times 0.70 = 7.7$$

$$E_T = 25 \times 0.20 = 5.0$$

$$E_T = 54 \times 0.10 = 5.4$$

$$\frac{18.1}{3} = 6.03 \approx 6.0$$

$$T_L = 0.46 \text{ (de la tabla 6-H).}$$

$$E_B = 2 \text{ (de la tabla 6-O).}$$

$$B_L = 0.97 \text{ (de la tabla 6-H).}$$

Substituyendo:

$$VS_D = 2000 \times 1.0 \times 0.66 \times 0.71 \times 0.46 \times 0.97 = 418$$

$$VS_D = 418 \text{ vph}$$

Comparando con el volumen de demanda:

$$410 \text{ vph} < 418 \text{ vph (} VS_D \text{)}$$

Conclusión:

Como el volumen de servicio es ligeramente mayor que el volumen de demanda, se deduce por lo tanto, que el subtramo está operando a un nivel de servicio D.

6.9 ANALISIS DE CAPACIDAD Y VOLUMENES DE SERVICIO EN ZONAS DE ENTRECruzAMIENTO

El análisis en zonas de entrecruzamiento es una parte tan necesaria en la determinación de la capacidad de un camino, como puede serlo cualquiera de los otros componentes, debiendo tomarse en cuenta si se quiere lograr un proyecto balanceado y evitar una sobrestimación de la capacidad general o nivel de operación de un camino.

Independientemente de la naturaleza de la zona de entrecruzamiento, en todos los casos son aplicables los mismos principios de operación y el mismo análisis.

En la Figura 6.28 se ilustra esquemáticamente, con varios ejemplos, la formación de zonas de entrecruzamiento; en estos esquemas se han indicado las longitudes en que se produce el entrecruzamiento.

6.9.1 Características de la operación en zonas de entrecruzamiento

Las zonas de entrecruzamiento se caracterizan por la convergencia de dos o más corrientes de tránsito a una área común del camino, dividiéndose poco después para salir divergiendo; estas maniobras se efectúan en una distancia relativamente limitada. En las Figuras 6.29-A y 6.29-B se muestran los entrecruzamientos que usualmente se resuelven por los métodos señalados en este capítulo, principalmente cuando se encuentran involucrados caminos de primer orden. El entrecruzamiento en dos lados

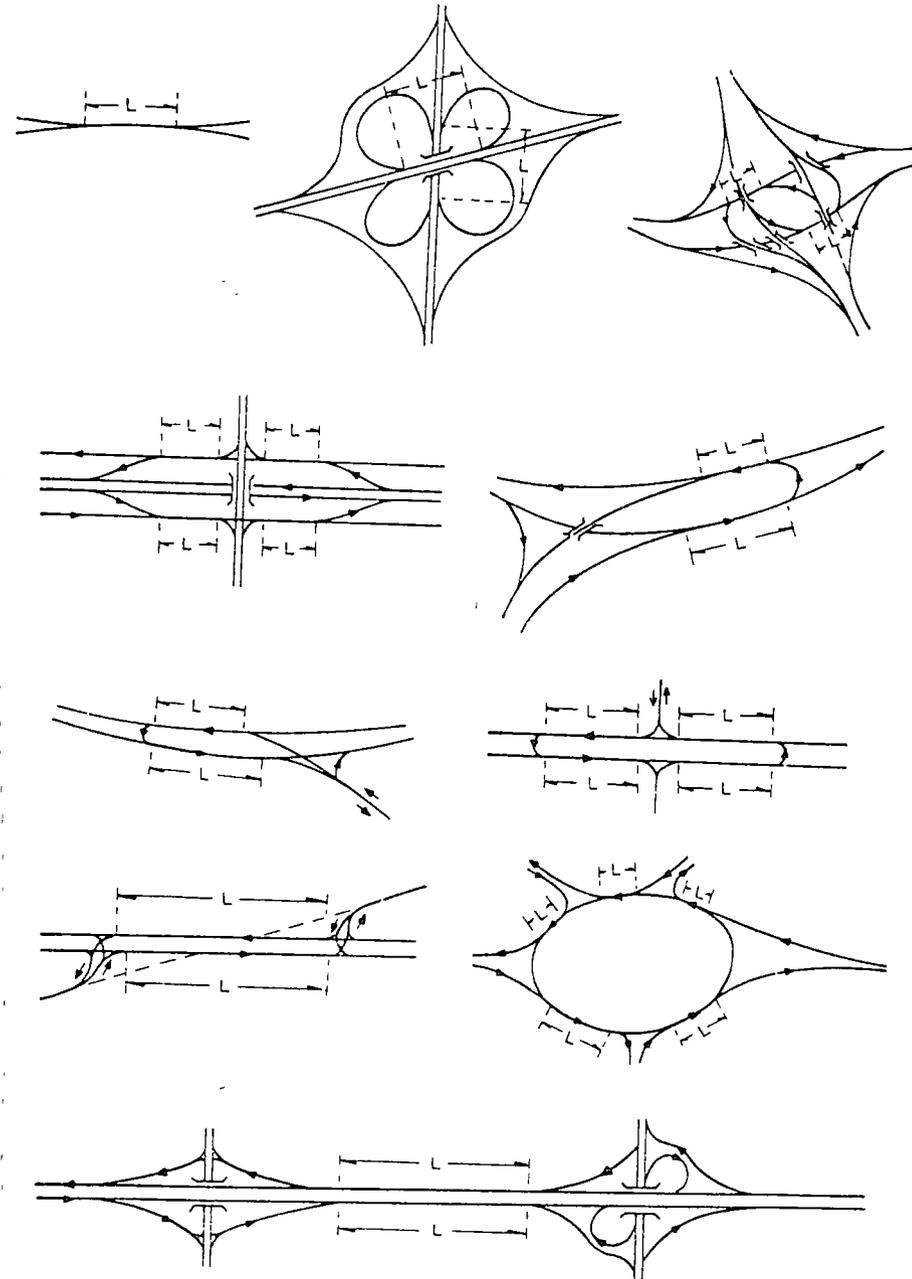


FIGURA 6.28 FORMACION DE ZONAS DE ENTRECRUZAMIENTO

mostrado en la Figura 6.29-D se maneja a menudo con los mismos métodos. Por otra parte, cuando el problema implica entrecruzamiento de un solo lado como el ilustrado en la Figura 6.29-C, es preferible usar los métodos descritos en el inciso 6.10 correspondiente a enlaces.

Una zona de entrecruzamiento acomoda dos clases de tránsito: 1) El tránsito que entra y pasa de largo saliendo de la zona sin cruzar la trayectoria normal de los otros vehículos, y 2) El tránsito que debe cruzar la trayectoria de los otros vehículos después de entrar a la zona de entrecruzamiento; es debido a este último grupo de vehículos, que se produce el entrecruzamiento.

A) Movimientos que no se entrecruzan. La determinación de la capacidad de carriles utilizados para el tránsito que no se entrecruza, no involucra ningún principio nuevo de análisis, siendo comparables a los carriles de una autopista. Para que una zona de entrecruzamiento funcione con eficiencia, es importante que estos carriles adicionales tengan la capacidad para alojar el tránsito que no se entrecruza.

B) Movimientos que se entrecruzan. Bien sea que la totalidad de los vehículos que entran a una zona de entrecruzamiento se entrecruzen o que existan vehículos que se entrecruzan y vehículos que vayan de paso, es evidente que cada vehículo que se entrecruza debe cruzar la línea real o imaginaria que conecta las narices de entrada y salida. En ningún momento, el número de vehículos, en el preciso instante de cruzar esta línea, puede exceder al número máximo que puede alojar un carril sencillo.

Con objeto de acomodar los movimientos de entrecruzamiento, usualmente se requiere un ancho adicional mayor que el de los accesos; es aparente también, que conforme los volúmenes que se entrecruzan se incrementan, se necesitan distancias más largas para ejecutar estas maniobras. Cuando el tránsito que se entrecruza se aproxima a un volumen igual al doble de la capacidad de un carril sencillo, se requiere teóricamente tres veces más longitud que la necesaria para un volumen de entrecruzamiento equivalente a la capacidad de un carril sencillo.

Puede decirse que el funcionamiento de una zona de entrecruzamiento depende fundamentalmente de la longitud y de la anchura de la zona, así como de la composición del tránsito.

C) Calidad del flujo. La operación en zonas de entrecruzamiento se mide en términos de la "calidad del flujo". La gráfica de la Figura 6.30 contiene una familia de curvas desde la I hasta la V, las cuales representan varias calidades del flujo variando desde excelente hasta pobre. Estos niveles de la calidad del flujo, aun cuando se relacionan a los niveles de servicio, son idénticos para todos los tipos de camino, no obstante que los niveles de servicio correspondientes varían dependiendo del tipo de camino involucrado.

D) Longitud de la zona de entrecruzamiento. La longitud de una zona de entrecruzamiento se mide a lo largo del camino entre la entrada y la salida, como se muestra en la Figura 6.31. Esta longitud se mide desde un punto del extremo de entrada, en el cual la distancia entre la prolongación de las orillas de la calzada sea de 0.60 m hasta un punto del extremo de salida, en el que la distancia entre la prolongación de las orillas de la calzada sea de 3.65 m.

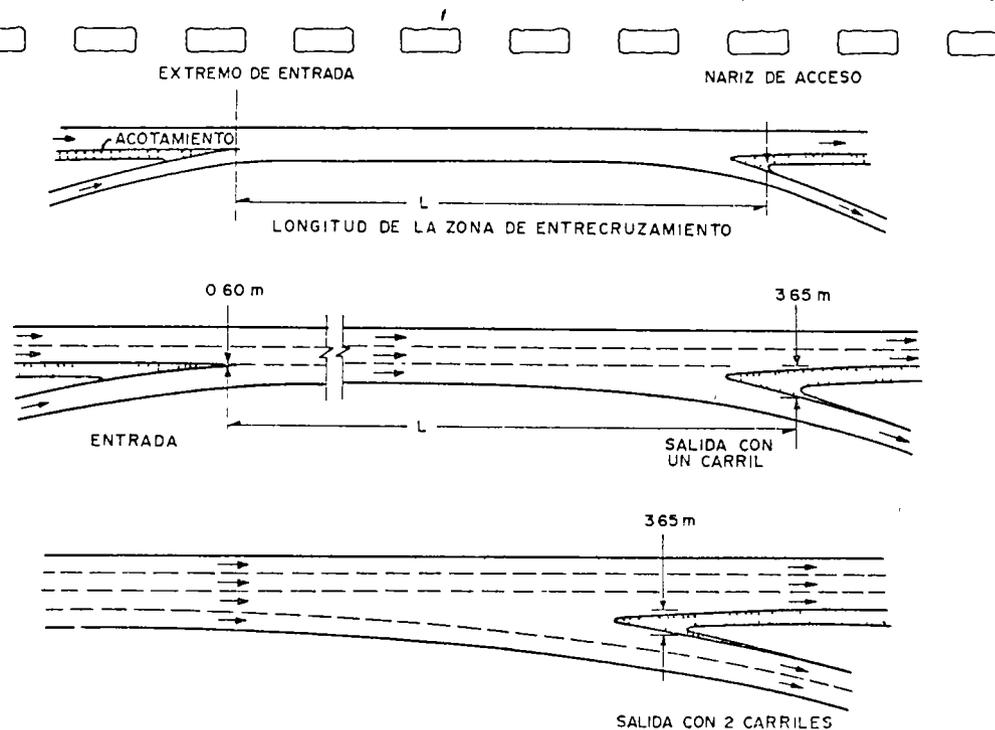


FIGURA 6.31. METODO PARA MEDIR LONGITUDES DE ZONAS DE ENTRECruzamiento

La longitud de la zona de entrecruzamiento se obtiene de la gráfica de la Figura 6.30 entrando con el volumen que se entrecruza ($V_{w_1} + V_{w_2}$) en vehículos ligeros por hora e intersectando la curva de la calidad del flujo deseada.

Es conveniente incrementar la longitud de la zona de entrecruzamiento, cuando las condiciones lo permitan, lográndose con esto disminuir el efecto adverso del entrecruzamiento.

E) Anchura de la zona de entrecruzamiento. La gráfica de la Figura 6.30 relaciona únicamente los volúmenes posibles de entrecruzamiento a diferentes niveles de operación, con la longitud de la zona. Sin embargo, la anchura de la zona de entrecruzamiento en términos del número de carriles, es otro factor que reviste la misma importancia.

En la solución completa de una zona de entrecruzamiento deben cumplirse ambos requisitos, es decir, longitud y anchura de la zona. Este análisis involucra primero, la determinación de la longitud con base en el volumen de entrecruzamiento y el nivel de operación deseado, y segundo, la determinación de la anchura que a su vez dependerá del volumen de entrecruzamiento, los volúmenes del tránsito que no se entrecruza y del volumen de servicio o capacidad.

El número de carriles para los volúmenes del tránsito que no se entrecruza, se calcula como si se tratara de circulación continua, es decir, dividiendo el volumen de demanda entre el volumen de servicio apropiado o capacidad; de esta manera, si los volúmenes del tránsito que no se entre-

cruza se representan por V_{o_1} y V_{o_2} y el volumen de servicio por carriles se representa por VS , el número de carriles requerido será $(V_{o_1} + V_{o_2}) / VS$.

Los carriles adicionales que se requieren para acomodar los volúmenes de entrecruzamiento se calculan en forma semejante, poniendo en este caso a los volúmenes de entrecruzamiento designados como V_{w_1} y V_{w_2} en el numerador y el mismo valor de VS en el denominador. Se ha demostrado que para volúmenes equivalentes es necesaria más anchura para alojar un flujo de entrecruzamiento, que para alojar un flujo continuo; con el fin de reflejar lo anterior, se ha desarrollado una fórmula racional con base en los datos disponibles, en la cual se plantea que el número de carriles necesario para entrecruzamiento es $(V_{w_1} + kV_{w_2}) / VS$, en donde V_{w_1} es el volumen mayor que se entrecruza en vph; V_{w_2} es el volumen menor que se entrecruza en vph; k es un factor de la influencia del entrecruzamiento, cuyo rango varía de 1.0 a 3.0; y VS es el volumen de servicio promedio por carril, de todas las vías que convergen y divergen a la zona, en vph. El factor k es un factor de equivalencia que expande la influencia del volumen menor de entrecruzamiento, hasta un máximo de tres veces su magnitud real en número de vehículos.

Considerando estas dos expresiones y suponiendo que algunos carriles son utilizados, tanto por los volúmenes de tránsito que no se entrecruza, como por los volúmenes de tránsito que se entrecruza, el número total de carriles viene a ser:

$$N = \frac{V_{w_1} + kV_{w_2} + V_{o_1} + V_{o_2}}{VS}$$

Si $V_{w_1} + V_{w_2} + V_{o_1} + V_{o_2} = V$, volumen total que aloja la zona de entrecruzamiento, la ecuación anterior se puede expresar como sigue:

$$N = \frac{V + (k - 1)V_{w_2}}{VS}$$

El valor máximo de k es aplicable a las zonas de entrecruzamiento más cortas, cuya operación está representada por las curvas III, IV y V

En donde la longitud real de la zona de entrecruzamiento es mayor que la mínima requerida, como es el caso de las condiciones que se muestran a la derecha de la curva III de la Figura 6.30, la influencia adversa del entrecruzamiento se hace cada vez menor, razón por la cual el factor k se va reduciendo gradualmente, hasta alcanzar el valor de 1.0 correspondiente a la curva I. Sobre esta curva y a la derecha de la misma, se considera que la zona queda fuera de la influencia del entrecruzamiento, reduciéndose la ecuación a la siguiente expresión:

$$N = \frac{V}{VS}$$

la cual representa el número de carriles requerido bajo condiciones de circulación continua.

El valor de VS usado para determinar el ancho de la zona de entrecruzamiento, deberá ser el volumen de servicio promedio por carril corres-

pendiente a las entradas y salidas de los caminos involucrados, debiéndose tomar en cuenta el factor de la hora de máxima demanda para los niveles C y D. Para autopistas, estos valores se indican en la tabla 6-C, debiendo ajustarse en caso necesario, para reflejar condiciones prevalcientes, tales como porcentaje de camiones, pendientes y anchos de carril.

Se han establecido, sin embargo, ciertas limitaciones del valor máximo de VS en relación con cada una de las diferentes calidades del flujo de entrecruzamiento (I a V). En efecto, el valor básico de la capacidad por carril de 2 000 vph, bajo condiciones ideales de la autopista, se reduce con objeto de reflejar la influencia de la turbulencia producida por el entrecruzamiento. Estos valores, los cuales siguen representando condiciones ideales tanto geométricas como del tránsito, se muestran en la tabla 6-P.

Para determinar el número de carriles que se requiere en zonas de entrecruzamiento bajo condiciones en las que el volumen de tránsito es muy fuerte, deberán emplearse los volúmenes de servicio por carril de la tabla 6-P, en lugar de los valores básicos de la tabla 6-C. De la misma manera, estos volúmenes deberán transformarse a valores de VS con los ajustes por ancho de carril, camiones, pendientes, etc.

CURVA DE LA CALIDAD DEL FLUJO	VALOR MAXIMO DE VS POR CARRIL Vehículos ligeros por hora
I	2 000
II	1 900
III	1 800
IV	1 700
V	1 600

TABLA 6-P. RELACION ENTRE LA CALIDAD DEL FLUJO Y EL VOLUMEN DE SERVICIO MAXIMO POR CARRIL, EN ZONAS DE ENTRECruzAMIENTO

F) Relaciones entre velocidad-volumen que se entrecruza-longitud, y ancho de las zonas de entrecruzamiento. Las relaciones velocidad-volumen junto con la longitud y ancho de la zona, tienen un efecto vital en las características de la operación y en la determinación de la calidad del flujo.

En zonas de entrecruzamiento con longitudes muy cortas, por ejemplo, de 20 a 30 metros, existirán pocos conflictos cuando son unos cuantos los vehículos que se entrecruzan; sin embargo, si la zona opera a la capacidad, muchos vehículos tendrán que detenerse y la zona fallará al no cumplir con el propósito previsto. La operación en estos casos es comparable a la de una intersección sin control de semáforos con una capacidad de 1 500 vph aproximadamente.

Por otra parte, zonas de entrecruzamiento más largas pueden alojar mucho más tránsito, permitiendo a la mayoría de los vehículos pasar

a través de la zona, sin reducciones intolerables de la velocidad. En general, mientras más larga es una zona, mayor es el volumen de entrecruzamiento que puede alojar y mayor la libertad de movimiento que puede lograrse.

Para condiciones donde la corriente del tránsito esté compuesta por vehículos que se entrecrucen y por vehículos que no se entrecrucen, las curvas III, IV y V de la Figura 6.30, representan el funcionamiento a volúmenes moderadamente altos, con velocidades de operación de los vehículos que se entrecruzan entre 60-70 km/h, 50-60 km/h y 30-50 km/h, respectivamente; este último es el rango aproximado al que se alcanza la capacidad.

En zonas de entrecruzamiento representadas por el área a la derecha de la curva III, pueden alcanzarse velocidades de operación arriba de 65 km/h. En general, la curva III representa una buena operación en donde sólo se requieren ligeros ajustes a la velocidad de los vehículos que se entrecruzan. De manera similar, la curva I representa condiciones de circulación en donde la velocidad del tránsito que se entrecruza, se aproxima a la velocidad de una carretera bajo condiciones de circulación continua.

En promedio, las velocidades de operación a través de zonas de entrecruzamiento para un nivel de servicio dado, son entre 10 y 20 km/h menores que las correspondientes a ese nivel en las entradas y salidas de las ramas de los caminos que forman la zona.

G) Influencia del entrecruzamiento. Dentro de la zona de entrecruzamiento el efecto se intensifica conforme la longitud de la zona se reduce, e inversamente, el efecto disminuye conforme la longitud se incrementa. Como consecuencia, debe existir un límite en el cual la longitud sea tan grande, que el efecto del entrecruzamiento se nulifique o se disipe.

No existen suficientes datos para definir las circunstancias en que el efecto del entrecruzamiento puede considerarse nulo y, por consiguiente, las longitudes donde no es necesario el proyecto de una zona de entrecruzamiento; sin embargo, hay indicios de que más allá de ciertas longitudes, y dentro de ciertos límites de volúmenes de entrecruzamiento, los niveles de operación o la capacidad se ven poco afectados por el entrecruzamiento. Cuando las combinaciones volumen-longitud de la tabla 6-Q sean excedidas, no es necesario proyectar un tramo de camino como zona de entrecruzamiento, sino bajo la base de circulación continua.

VOLUMENES QUE SE ENTRECruZAN Vehículos ligeros por hora	LONGITUD DE LA ZONA DE ENTRECruZAMIENTO m
500	300
1 000	750
1 500	1 250
2 000	1 850

TABLA 6-Q. COMBINACIONES VOLUMEN-LONGITUD CONSIDERADAS FUERA DE LA INFLUENCIA DEL ENTRECruzAMIENTO

6.9.2 Niveles de servicio y capacidad

El entrecruzamiento puede ocurrir bajo una amplia variedad de condiciones en caminos de todos los tipos, desde autopistas hasta calles urbanas. Debido a que cada uno de estos tipos de camino tiene su propia escala de niveles de servicio, no es posible aplicar la designación básica, A hasta F, a las curvas de la gráfica de la Figura 6.30. El criterio en este caso es considerar que estas curvas representan diferentes niveles de la calidad del flujo, aceptables para el conductor, las cuales son denominadas desde I hasta V. La tabla 6-R se utiliza como referencia para relacionar estas calidades, con los niveles de servicio correspondientes al camino particular en estudio.

CALIDAD DE FLUJO (a)				
NIVEL DE SERVICIO	AUTOPISTAS Y CARRETERAS DE CARRILES MÚLTIPLES		EN CAMINOS DE DOS CARRILES	EN ARTERIAS URBANAS Y SUBURBANAS
	En la carretera	En los entronques		
A	I — II	II — III	II	III — IV
B	II	III	II — III	III — IV
C	II — III	III — IV	III	IV
D	III — IV	IV	IV	IV
E (b)	IV — V	V	V	V
F	←————— No satisfactorio (c) —————→			

(a) Representada por las curvas de la Figura 6.30. Las relaciones abajo de la línea gruesa normalmente no se consideran para proyecto. Cuando aparecen dos valores, el de la izquierda es el deseable y el de la derecha, el mínimo.

(b) Operación a la capacidad.

(c) Volumen máximo, equivalente a la calidad del flujo V, pero puede ser mucho más bajo.

TABLA 6-R. RELACIONES ENTRE LOS NIVELES DE SERVICIO EN EL CAMINO Y LA CALIDAD DEL FLUJO EN LAS ZONAS DEL ENTRECruzAMIENTO

El proyecto de una zona de entrecruzamiento deberá basarse en el nivel de servicio general que se desea proporcionar en todo el camino.

En la tabla 6-R, la calidad de la operación en una zona de entrecruzamiento, está representada por las curvas I a V de la Figura 6.30; asimismo, se indica su relación con los niveles de servicio básicos para un camino en particular, del cual la zona de entrecruzamiento forma parte.

Cuando aparecen dos valores de la calidad del flujo para un mismo nivel de servicio del camino, se considera al primero de ellos como el valor deseable, en tanto que al segundo normalmente se le utiliza como el valor mínimo para proyecto. Las relaciones abajo de la línea gruesa, generalmente no se consideran para proyecto.

6.9.3 Procedimientos para el proyecto y evaluación operacional de zonas de entrecruzamiento

El análisis de zonas de entrecruzamiento simples es relativamente fácil; este análisis requiere del uso de la gráfica y de la ecuación de la Figura 6.30 con referencia a las tablas 6-P y 6-R, para determinar la longitud y ancho de la zona, dados los volúmenes de demanda. Los volúmenes de tránsito a través de la zona deben mostrarse por separado, incluyendo los volúmenes que no se entrecruzan, el volumen mayor de entrecruzamiento y el volumen menor de entrecruzamiento. El procedimiento puede usarse a la inversa cuando se tienen como datos las características geométricas y se desean obtener las características operacionales.

Las curvas de la Figura 6.30 ligan a los tres factores básicos: longitud de la zona de entrecruzamiento, volumen total de entrecruzamiento y calidad del flujo. Conociendo dos, es posible encontrar el tercero. En problemas típicos se conoce el nivel de servicio, por lo que la calidad del flujo en la zona de entrecruzamiento debe correlacionarse con los niveles de servicio para cada tipo de camino, de acuerdo con las relaciones de la tabla 6-R.

Es necesario tomar ciertas precauciones en relación con el volumen de servicio por carril VS que entra como denominador en la ecuación de la Figura 6.30. En primer lugar, al determinar el valor promedio de VS para las diferentes entradas y salidas del camino, es importante recordar que, en el caso de autopistas, el volumen de servicio por carril en los accesos y salidas de la zona, variará para un nivel de servicio particular, dependiendo del número de carriles; y en segundo lugar, deberán tomarse en cuenta las limitaciones máximas al VS para las diferentes calidades del flujo, tal como se indica en la tabla 6-P.

A) Secuela por fines de proyecto.

Si los datos son:

- Ubicación de la zona de entrecruzamiento.
- Volúmenes de demanda.
- Composición del tránsito.
- Número y ancho de carriles en accesos y salidas de los caminos involucrados.
- Nivel de servicio en cada camino.
- Pendiente en la zona de entrecruzamiento.
- Longitud máxima disponible para el entrecruzamiento.

Y se desea conocer:

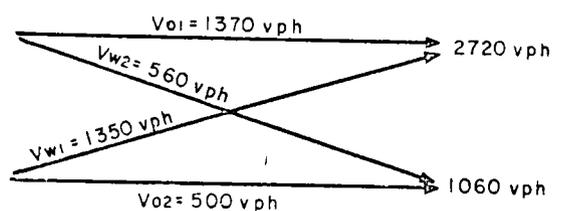
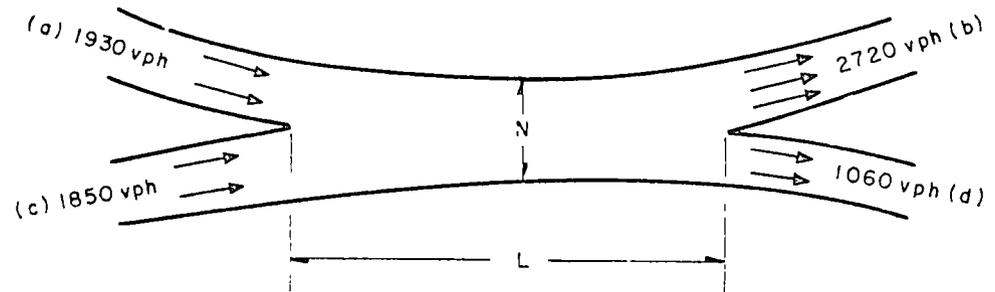
- La longitud y el número de carriles para proporcionar una calidad de flujo compatible con los niveles de servicio de los caminos.

La secuela a seguir es la siguiente:

1. Determinése la calidad de flujo compatible con el nivel de servicio en los caminos, entrando a la tabla 6-R, tomando en cuenta el tipo de caminos que forman la zona de entrecruzamiento.

2. Transfórmense los volúmenes de entrecruzamiento V_{w1} y V_{w2} en vehículos ligeros equivalentes, con la fórmula:

$$\text{Vehículos ligeros} = \frac{V_{w1} + V_{w2}}{T_L}$$



Volumenes de demanda en la zona de entrecruzamiento

B. Determinese:

1. Longitud de la zona de entrecruzamiento.
2. Ancho de la zona de entrecruzamiento.

C. Solución:

1. Determinación de la longitud de la zona de entrecruzamiento: obténgase primero la calidad del flujo compatible con el nivel de servicio en los caminos, empleando la tabla 6-R. Tomando en cuenta el tipo y los niveles de servicio de los caminos que forman la zona de entrecruzamiento, se tiene una calidad del flujo que puede ser II o III. Para fines de proyecto se considera la calidad II, que es la deseable.

Transfórmense los volúmenes de entrecruzamiento a vehículos ligeros equivalentes.

$$\text{Vehículos ligeros} = \frac{V_{w1} + V_{w2}}{T_L}$$

En la cual:

$$V_{w1} = 1350 \text{ vph}$$

$$V_{w2} = 560 \text{ vph}$$

$$V_{w1} + V_{w2} = 1910 \text{ vph}$$

$$T_L = 0.71 \text{ (de la tabla 6-H en combinación con la tabla 6-F).}$$

$$\text{Vehículos ligeros} = \frac{1910}{0.71} = 2690 \text{ vph}$$

Con la calidad del flujo II y el volumen de entrecruzamiento en vehículos ligeros, antes calculado, éntrese a la gráfica de la Figura 6.30 para obtener la longitud de la zona de entrecruzamiento; $L = 1350 \text{ m}$.

Como 1350 m es mayor que la longitud disponible (800 m), será necesario aceptar una calidad del flujo menor que la establecida. Considerando la calidad mínima aceptable III, se obtiene de la misma gráfica de la Figura 6.30 una longitud de 710 m , la cual queda dentro de la longitud máxima disponible.

2. Determinación del ancho de la zona de entrecruzamiento.

$$N = \frac{V + (k-1)V_{w2}}{VS}$$

$$V = 1930 + 1850 = 3780 \text{ vph}$$

$$k = 3.0 \text{ para la calidad del flujo III}$$

$$V_{w2} = 560 \text{ vph}$$

$$VS = \frac{VS \text{ en cada rama}}{\text{Carriles de todas las ramas}}$$

VS	en las ramas a, c y d	$= 2750 \times 3 = 8250 \text{ vph}$	(de la tabla 6-C)
VS	en la rama b	$= 4350$	$= 4350 \text{ vph}$ (de la tabla 6-C)
TOTAL			12600 vph

$$VS \text{ promedio} = \frac{12600}{9} = 1400 \text{ vph}$$

Comparando con el valor máximo admisible de la tabla 6-P

$$1400 \text{ vph} < 1800 \text{ vph (calidad del flujo III)}$$

Factor de ajuste por vehículos pesados $T_L = 0.71$ (obtenido en la primera parte de la solución)

Aplicando el factor se obtiene el VS promedio en tránsito mixto.

$$VS \text{ promedio} = 1400 \times 0.71 = 994 \text{ vph}$$

Substituyendo:

$$N = \frac{3780 \times (3.0 - 1) \times 560}{994} = 4.91 \approx 5$$

$$N = 5 \text{ carriles}$$

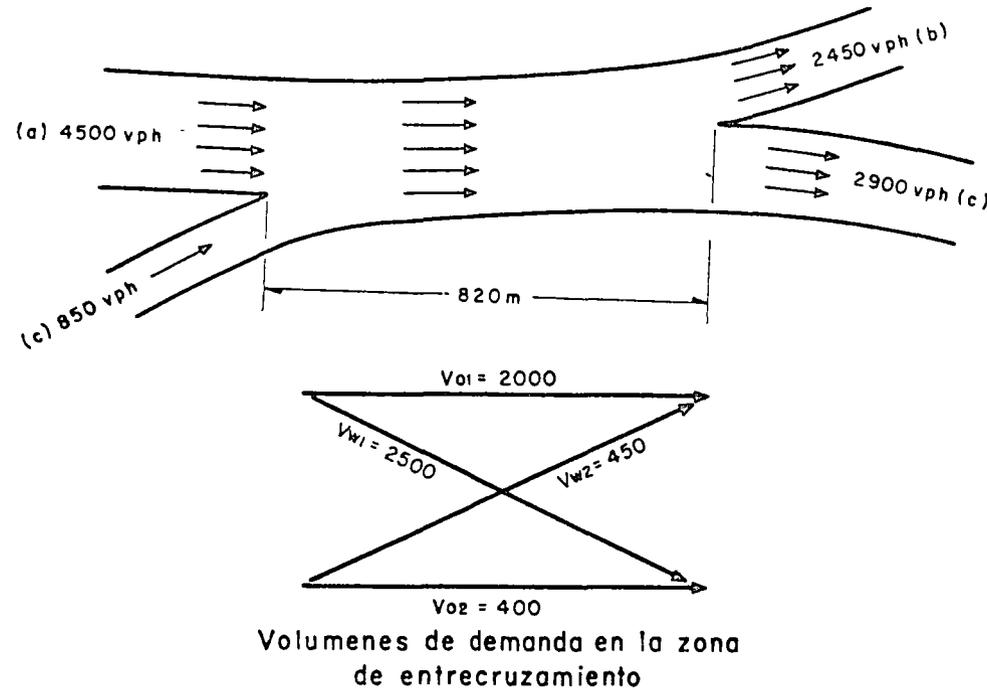
Ejemplo 2.

A. Datos.

Entrecruzamiento ubicado en el entronque de una autopista. Volúmenes de demanda (ver croquis de la pág. 224).

Composición del tránsito: vehículos pesados = 3%
vehículos ligeros = 97%

Longitud de la zona de entrecruzamiento = 820 m.
Número de carriles (representado por flechas en el croquis).
Ancho de los carriles = 3.65 m c/u.
Nivel de servicio en cada camino = C.
Pendiente en la zona de entrecruzamiento = 8%.



B. Determinese:

1. La calidad del flujo en la zona de entrecruzamiento.
2. El nivel de servicio en las ramas de la zona de entrecruzamiento.

C. Solución:

1. Determinación de la calidad del flujo.

Transfórmense los volúmenes de entrecruzamiento a vehículos ligeros, con la expresión:

$$\text{Vehículos ligeros} = \frac{V_{w_1} + V_{w_2}}{T_L}$$

$$V_{w_1} = 2\,500 \text{ vph}; \quad V_{w_2} = 450 \text{ vph}$$

Para determinar T_L , se considera que la longitud de la pendiente empieza 400 m antes de la zona de entrecruzamiento; por lo tanto, la longitud de la pendiente será de $400 + 820 = 1\,220$ m.

De acuerdo con lo anterior, $E_T = 10$ (de la tabla 6-F)

$$y \quad T_L = 0.79 \text{ (de la tabla 6-H)}$$

Substituyendo:

$$\text{Vehículos ligeros} = \frac{450 + 2\,500}{0.79} = 3\,735 \text{ vph}$$

Con este volumen y la longitud de la zona de entrecruzamiento en la gráfica de la Figura 6.30, se obtiene que la calidad del flujo está comprendida entre III y IV, con un valor de $k = 3.0$.

Verifíquese que el número de carriles en la zona de entrecruzamiento sea el adecuado para la calidad del flujo obtenida anteriormente, utilizando la expresión:

$$N = \frac{V(k-1)V_{w_2}}{VS}$$

$$V = 4\,500 + 850 = 5\,350 \text{ vph}$$

$$k = 3.0$$

$$V_{w_2} = 450 \text{ vph}$$

$$VS \text{ promedio} = \frac{VS \text{ en cada rama}}{\text{Carriles de todas las ramas}}$$

$$VS \text{ en la rama (a)} = 6\,000 \text{ vph (de la tabla 6-C)}$$

$$VS \text{ en la rama (b)} = 1\,650 \text{ vph (de la tabla 6-C)}$$

$$VS \text{ en las ramas (c) y (d)} = 4\,350 \times 2 = 8\,700 \text{ vph (de la tabla 6-C)}$$

$$\text{TOTAL} = 16\,350 \text{ vph}$$

$$VS \text{ promedio} = \frac{16\,350}{11} = 1\,486 \text{ vph}$$

Comparando con el VS máximo admisible de la tabla 6-P

$$1\,486 \text{ vph} < 1\,800 \text{ vph (calidad del flujo III)}$$

Factor de ajuste por vehículos pesados = 0.79 (obtenido en la primera parte de la solución).

$$VS \text{ prom.} = 1\,486 \times 0.79 = 1\,174 \text{ vph (tránsito mixto)}$$

Substituyendo:

$$N = \frac{5\,350 + (3.0-1)450}{1\,174} = 5.3$$

Comparando con el número de carriles en la zona de entrecruzamiento:

$$5 \approx 5.3$$

De lo anterior se concluye que el número de carriles es el adecuado para la calidad del flujo inicialmente encontrada (III — IV).

2. Determinación del nivel de servicio en las ramas, considerando la influencia de la calidad del flujo existente en la zona de entrecruzamiento.

Sabiendo que la zona de entrecruzamiento está ubicada en el entronque de una autopista y que la calidad del flujo está comprendida entre III y IV, de la tabla 6-R se obtiene que en el nivel de servicio en las ramas es C; este nivel de servicio coincide con el nivel de servicio dado como dato en el ejemplo.

Lo anterior indica que la operación en la zona de entrecruzamiento y la operación en los caminos que la forman, guardan el balance apropiado.

6.10 ANALISIS DE CAPACIDAD Y VOLUMENES DE SERVICIO EN VIAS DE ENLACE

Una vía de enlace es aquella que permite al tránsito cambiar de un camino a otro. En intersecciones es conocida como aquella que une dos ramas de la intersección.

La influencia de la operación de una vía de enlace puede aplicarse a todos los caminos que tengan varios carriles y, por supuesto, que tengan enlaces. Como las autopistas son los caminos que siempre cumplen con las condiciones citadas, en lo sucesivo para hacer más simple la redacción, se hará referencia a este tipo de camino.

Las características de operación en los enlaces pueden afectar directamente la eficiencia del movimiento del tránsito en los carriles de una autopista; un proyecto deficiente de las vías de enlace limita seriamente el volumen de tránsito que puede entrar a una autopista. El diseño y ubicación apropiados de los enlaces en caminos con altos volúmenes de tránsito revisten, por consiguiente, gran importancia si el propósito que se persigue es el de ofrecer una operación rápida, segura y eficiente.

6.10.1 Consideraciones generales

A continuación se describen algunos de los conceptos más importantes en relación con el proyecto y la operación del tránsito en los enlaces; debiéndose señalar que al no tomar en consideración cualquiera de estos conceptos, existe la posibilidad de tener reducciones considerables en el volumen de servicio, bajo condiciones de altos volúmenes de tránsito.

A) Entrecruzamiento entre enlaces sucesivos. Cuando existe una distancia relativamente corta entre un enlace de entrada y uno de salida, usualmente se presenta una situación de entrecruzamiento de un solo lado. Como ya se indicó al tratar lo relativo a entrecruzamientos, los procedimientos de análisis que se proponen aquí, son más apropiados para la determinación de la capacidad y de los volúmenes de servicio en los entrecruzamientos que se producen en un solo lado de la autopista.

B) Consideración de períodos de volúmenes máximos. En ningún otro punto del camino es tan importante conocer el volumen de tránsito durante

intervalos de tiempo dentro de los períodos máximos, como lo es en los enlaces. En muchos casos, los datos del volumen horario pueden ser inadecuados, debido a que el flujo máximo en el enlace puede ocurrir en un intervalo diferente dentro de la hora, que el del flujo máximo en la autopista. Al aplicar los procedimientos de análisis para enlaces a la solución específica de problemas operacionales, las características de los máximos dentro de la hora son los críticos, por lo que deberán usarse volúmenes horarios, basados en estos períodos de tiempo más cortos que el de una hora.

C) Influencia del diseño. Los procedimientos de cálculo que se incluyen más adelante para los diferentes niveles de servicio, están basados en diseños modernos y adecuados. Actualmente, se llevan a cabo investigaciones para proporcionar un conocimiento más específico, del efecto que tiene la ausencia de carriles de aceleración y poder contar con factores de ajuste, que puedan aplicarse a proyectos de esta índole.

D) Factores que controlan la capacidad. La capacidad de un enlace de una autopista se determina por el menor de los tres siguientes valores: 1) la capacidad en el extremo que conecta con la autopista, 2) la capacidad del enlace propiamente dicho, y 3) la capacidad en el extremo que conecta con el camino secundario.

La capacidad de un enlace de un solo carril, puede alcanzar bajo condiciones ideales 2 000 vph; sin embargo, las restricciones en las características geométricas de la mayor parte de los enlaces, tales como pendientes, curvatura y otras semejantes, ocasionan que el valor anterior sea considerablemente más bajo.

En los extremos de los enlaces que conectan con las autopistas, el volumen de tránsito en el carril exterior de la autopista (carril Núm. 1) tiene un efecto notable en las operaciones de entrada y salida, y usualmente es el elemento que controla los volúmenes de servicio y la capacidad que puede alcanzarse en el enlace.

E) Conexiones de los enlaces de entrada. En los extremos de los enlaces de entrada que conectan con la autopista, generalmente el conductor que circula por el enlace y se dispone a entrar a la autopista, tiene necesidad de hacer una evaluación de la corriente del tránsito y hacer los ajustes necesarios de velocidad, para poder lograr incorporarse en el espacio escogido entre vehículos.

Resulta de lo anterior, que el elemento crítico para evaluar la capacidad en los extremos de los enlaces de entrada, es la disponibilidad de suficiente espacio en la corriente del tránsito en el carril Núm. 1.

En otras palabras, que el factor esencial en la determinación del volumen de servicio y de la capacidad, depende de la estimación que se haga del volumen en el área de maniobra donde convergen el tránsito del carril Núm. 1 de la autopista y el del enlace, conocidos los volúmenes de la autopista, la separación de los enlaces adyacentes y los volúmenes de tránsito en ellos.

F) Conexiones de los enlaces de salida. En el caso de enlaces de salida, el factor esencial que influye en la determinación de la capacidad y de los volúmenes de servicio, es la estimación del volumen en el área de maniobra donde divergen el tránsito del carril Núm. 1 de la autopista y el del enlace,

En la descripción anterior de niveles de servicio, se supone que no existe un ancho adicional de la calzada del camino en ningún punto a través de las zonas de entrada y de salida. En la práctica, un carril auxiliar puede mejorar grandemente las operaciones en lugares donde un enlace de salida se encuentra a poca distancia de uno de entrada. De hecho, este elemento es la clave para mantener un nivel de servicio balanceado en todo el camino.

En la tabla 6-S se sintetizan los criterios fundamentales de niveles de servicio antes señalados, para los casos de entradas y salidas simples. Esta tabla no deberá usarse directamente para cálculos de capacidad y volúmenes de servicio, sin hacer referencia a los procedimientos que se describen más adelante, en este inciso.

6.10.3 Determinación de la capacidad y el volumen de servicio en el extremo del enlace que conecta con la autopista

Los procedimientos para determinar los volúmenes aceptables en los extremos de los enlaces, se basan en la premisa de que si el volumen de demanda no excede al volumen de servicio en ciertos puntos críticos, como los que se muestran en la Figura 6.32, se tendrán buenas condiciones de operación tanto en la autopista como en el enlace, sin requerirse un mayor análisis.

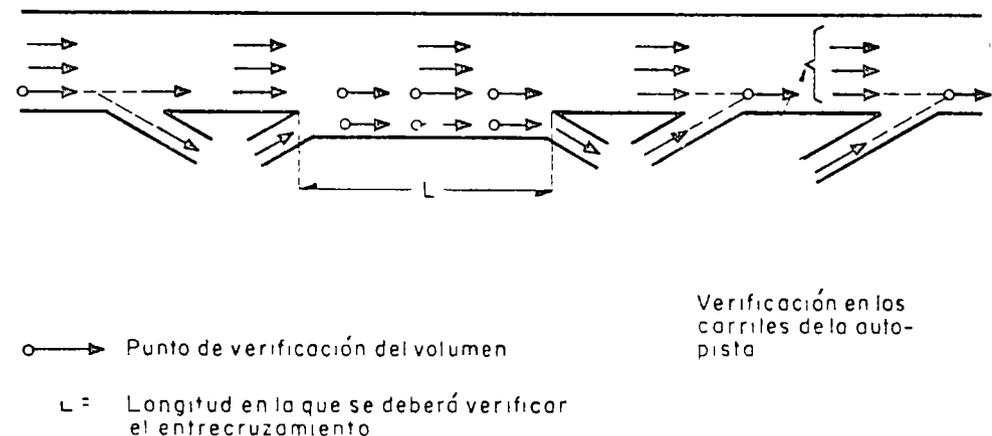


FIGURA 6.32. PUNTOS CRITICOS DE VERIFICACION

Existen dos procedimientos para la determinación de volúmenes de servicio, dependiendo del nivel de servicio por analizar.

6.10.3.1 Cálculo de volúmenes de servicio para los niveles A, B y C

Para propósitos de proyecto, donde se deseen condiciones de circulación continua, como las proporcionadas por un nivel de servicio C o mejor, el procedimiento empleado requiere del uso de ecuaciones, en las cuales están involucrados los siguientes conceptos: a) el volumen de tránsito en el

enlace en estudio, b) el volumen de tránsito en la autopista, inmediatamente antes de que conecte el enlace, c) las distancias entre enlaces adyacentes y los volúmenes de tránsito en ellos antes y después de su conexión con la autopista.

Estas ecuaciones han sido obtenidas por medio de técnicas de regresión múltiple y se emplean para calcular los volúmenes de tránsito probable en el carril Núm. 1, en puntos de verificación seleccionados.

Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Establézcanse las características geométricas del lugar en estudio, incluyendo el número de carriles de la autopista y la ubicación y tipo de los enlaces adyacentes.

2. Establézcanse los volúmenes de demanda para todos los movimientos vehiculares.

3. Elijase de entre los diferentes casos mostrados en las Figuras 6.33 a 6.50, la ecuación apropiada de acuerdo con las características geométricas y de operación involucradas, y con ésta calcúlese el volumen de tránsito probable en el carril Núm. 1, en el punto o los puntos de verificación necesarios.

4. Analícese el criterio señalado en los puntos anteriores, de la manera siguiente:

a) En el punto de convergencia, el volumen que entra por el enlace se suma al volumen calculado en el carril Núm. 1. Este volumen total que llega al punto de convergencia después de la salida, se compara con el volumen de servicio que se da en la tabla 6-S correspondiente al punto de convergencia que se está verificando.

b) En el punto de divergencia, el volumen calculado en el carril Núm. 1 (que incluye a los vehículos de paso que circularán en este carril y a los vehículos a punto de salir), se compara con los volúmenes de servicio en el punto de divergencia, señalados en la tabla 6-S.

c) Cuando existen carriles auxiliares, entre un enlace de entrada y uno de salida, se calculan los volúmenes en el carril auxiliar y en el carril Núm. 1, en puntos seleccionados entre los dos enlaces. Estos volúmenes se comparan con los volúmenes de servicio de convergencia o de divergencia de la tabla 6-S dependiendo de la ubicación de los puntos de verificación.

d) Cuando exista entrecruzamiento entre enlaces espaciados a corta distancia, en la tabla 6-S se indican los volúmenes máximos de entrecruzamiento admisibles, con los cuales hay que comparar la suma de los volúmenes de los enlaces. En caso necesario deben efectuarse verificaciones del entrecruzamiento, en puntos a cada 150 m.

e) En el caso de enlaces de dos carriles, los diferentes volúmenes de convergencia y de divergencia por verificar, se comparan con los volúmenes de servicio de convergencia y de divergencia de la tabla 6-S.

f) El volumen total de tránsito en la autopista, se compara con el volumen de servicio de la tabla 6-S. En este procedimiento, los carriles auxiliares no cuentan como carriles de la autopista.

5. Evalúense e intérpretense los resultados del análisis efectuado en el punto 4, de la manera siguiente:

Los volúmenes de servicio para un nivel de servicio en particular, no deberán ser excedidos en ningún caso por los volúmenes de demanda si se

desea mantener una armonía completa en el proyecto. Si no son excedidos, el proyecto se considera satisfactorio para la operación del tránsito al nivel de servicio elegido. Si los volúmenes de servicio son excedidos en uno o más puntos de verificación, es recomendable hacer lo siguiente:

a) En el caso de un diseño nuevo, rediseñese o acéptese un nivel de servicio más bajo.

b) En el caso de una obra existente, considérese la reconstrucción o acéptese un nivel de servicio restringido.

La meta usual, si se decide reconstruir o rediseñar, es la de reducir los volúmenes en los puntos de verificación, de tal manera que queden dentro del rango de volúmenes de servicio correspondiente al nivel de servicio elegido. Los siguientes son ejemplos de posibles soluciones:

- Agregar otro carril auxiliar.
- Aumentar la distancia entre enlaces.
- Distribuir entre dos enlaces los volúmenes altos de un enlace.
- Aumentar el número de carriles de la autopista.

A) Variables consideradas. La serie de ecuaciones mostradas en las Figuras 6.33 a 6.50, involucran un cierto número de factores y variables, aun cuando no todos ellos se utilizan en una sola ecuación. Estos se definen a continuación:

$V_1 = (1)$ Para un enlace de entrada, V_1 es el volumen en el carril Núm. 1 de la autopista, a la altura de la nariz del enlace de entrada, precisamente antes de que tenga lugar la convergencia.

$= (2)$ Para un enlace de salida, V_1 es el volumen en el carril Núm. 1, inmediatamente antes de que tenga lugar la divergencia.

$= (3)$ Para un enlace de salida de dos carriles, V_1 es el volumen en el carril Núm. 1, inmediatamente después de que tenga lugar la divergencia.

$V_{1+A} = (1)$ Para un enlace de entrada de dos carriles, V_{1+A} es el volumen en el carril Núm. 1 de la autopista más el volumen del carril izquierdo del enlace (el carril del enlace más cercano a la autopista).

$= (2)$ Para un enlace de salida de dos carriles, V_{1+A} es el volumen en el carril Núm. 1 más el volumen en el carril izquierdo del enlace antes de que tenga lugar la divergencia.

$V_c =$ Para la bifurcación de los tres carriles en un solo sentido de una autopista, en dos ramas de dos carriles cada una, V_c es el volumen en el carril central antes de que éste se divida en el carril Núm. 1 de la rama más importante y en el carril izquierdo de la otra rama.

$V_t =$ Para un enlace de entrada, V_t es el volumen en la autopista, total para todos los carriles en un sentido, a la altura de la nariz del enlace, precisamente antes de que tenga lugar la convergencia.

$V_i =$ Para un enlace de salida, V_i es el volumen en la autopista, total para todos los carriles en un solo sentido, inmediatamente antes de que tenga lugar la divergencia.

$V_r = (1)$ Para un enlace de entrada, V_r es el volumen que llega a la zona de convergencia a través del enlace.

$= (2)$ Para un enlace de salida, V_r es el volumen que sale por el enlace proveniente de la zona de divergencia.

$= (3)$ Para una bifurcación, V_r es el volumen que usa la rama derecha de la bifurcación.

$D =$ Distancia en metros, medida como se indica en la Figura 6.31, desde el enlace que se está considerando hasta el enlace inmediato anterior de entrada o de salida.

$V =$ Volumen en el enlace inmediato anterior al que se está considerando, bien sea de entrada o de salida.

$D_d =$ Distancia en metros, medida como se indica en la Figura 6.31, desde el enlace que se está considerando hasta el enlace inmediato posterior de entrada o de salida.

$V_d =$ Volumen en el enlace inmediato posterior al que se está considerando, bien sea de entrada o de salida.

B) Elementos adicionales que requieren consideración. Uso de carril auxiliar. Las Figuras 6.37, 6.38, 6.42, 6.43 y 6.47, se usan para el análisis de los enlaces de entrada, cuando existe un carril auxiliar que se prolonga hasta un enlace de salida inmediato posterior. La presencia de carriles auxiliares cambia, en cierto modo, los procedimientos de cálculo que se usan en situaciones comunes de convergencia y divergencia. La mayor oportunidad de entrecruzamiento o de cambio de carril que ocurre entre el carril Núm. 1 y el carril auxiliar, hace necesario el cálculo del volumen en puntos seleccionados entre las narices de los enlaces; debiéndose verificar también, el volumen de entrecruzamiento en puntos situados a cada 150 m.

El cálculo de los volúmenes en el carril Núm. 1 y en el carril auxiliar, deben verificarse por separado, comparándolos con los volúmenes de servicio de la tabla 6-S. Si los puntos de verificación están situados a la mitad de la distancia entre enlaces o más cercanos al enlace de entrada, la comparación se hace con los volúmenes de servicio de convergencia; si el punto se encuentra más cercano al enlace de salida, la comparación deberá hacerse con los volúmenes de servicio de divergencia. Para una verificación de volúmenes en todos los carriles de la autopista, no deberá incluirse dentro del volumen total el volumen en el carril auxiliar.

Para el análisis de situaciones donde existe un carril auxiliar, se emplean las curvas de la Figura 6.51 junto con las ecuaciones correspondientes; su uso permite el análisis de los movimientos de cambio de carril que se producen en un momento dado, en cualquier punto a lo largo del carril auxiliar. El procedimiento de cálculo es el siguiente:

a) Determinése el volumen en el carril Núm. 1, usando la ecuación apropiada al caso (Figuras 6.37, 6.38, 6.42, 6.43 y 6.47). Este volumen en el carril Núm. 1 se compone de los vehículos que van de paso y de los que van a dejar la autopista por medio del enlace de salida. Al calcular el tránsito de paso en el carril Núm. 1, se considera que el 100 por ciento de los vehículos que van a salir, permanecen en el carril Núm. 1 desde el enlace de entrada.

b) Réstese el volumen en el enlace de salida, del volumen calculado en el carril Núm. 1 para obtener el volumen que va de paso en el carril Núm. 1 (Volumen que va de paso = $V_1 - V_r$).

c) Háganse varias verificaciones de volúmenes en el carril Núm. 1 y en el carril auxiliar en puntos situados entre enlaces. Estos volúmenes se determinan como sigue:

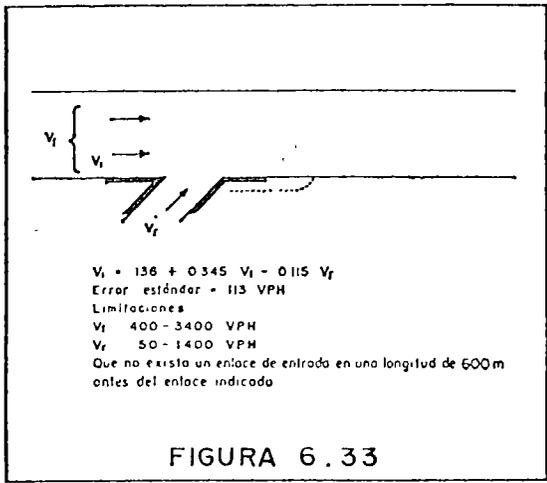


FIGURA 6.33

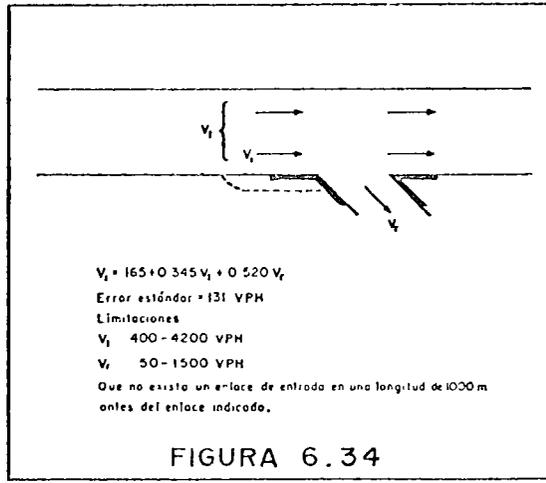


FIGURA 6.34

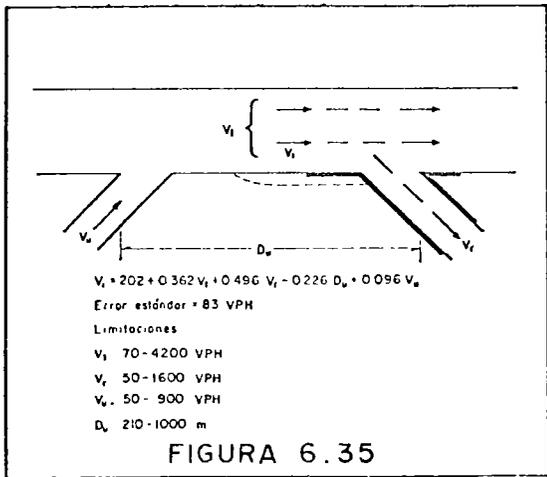


FIGURA 6.35

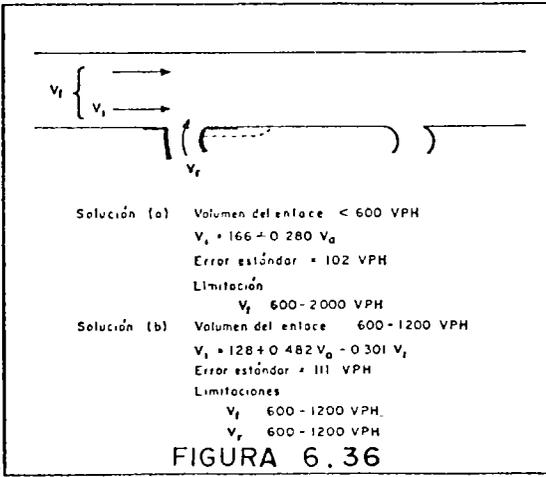


FIGURA 6.36

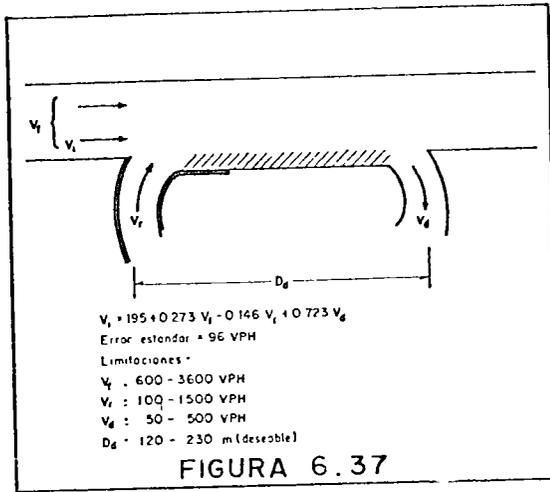


FIGURA 6.37

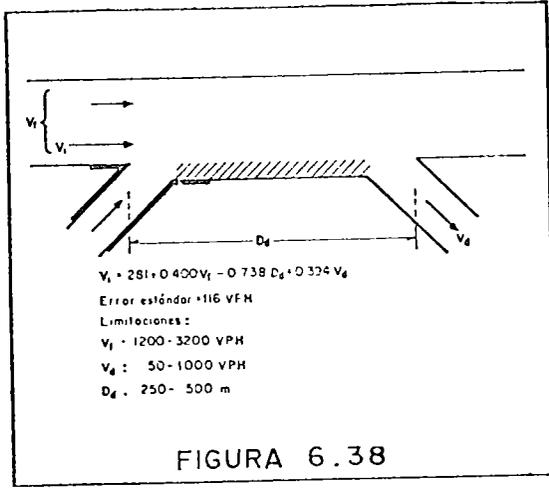


FIGURA 6.38

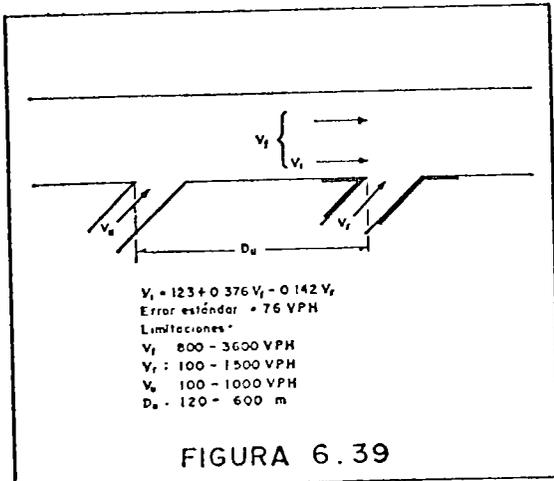


FIGURA 6.39

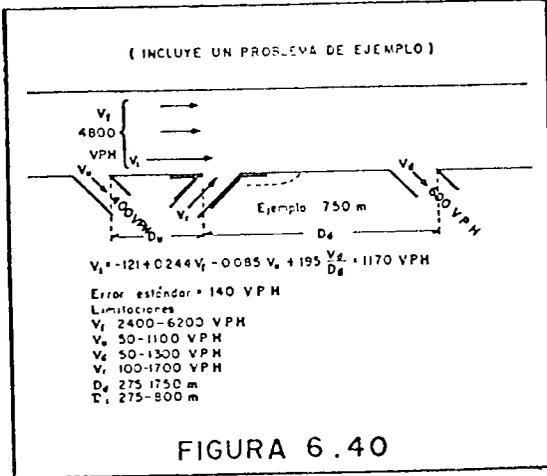
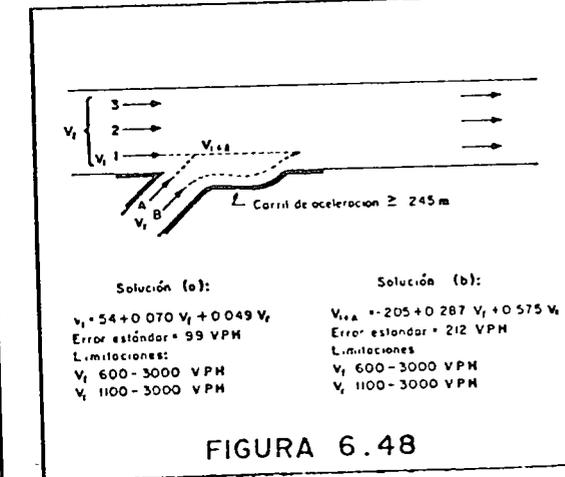
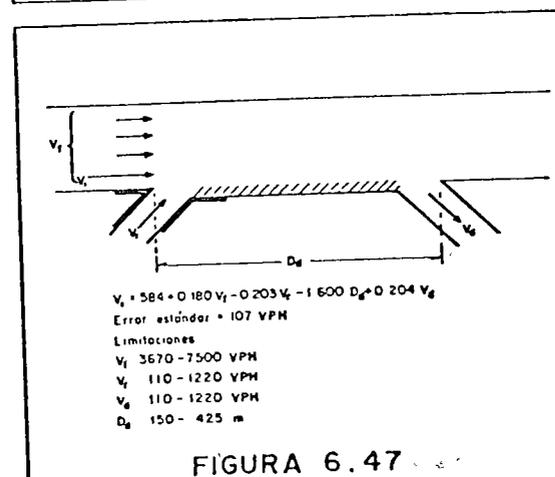
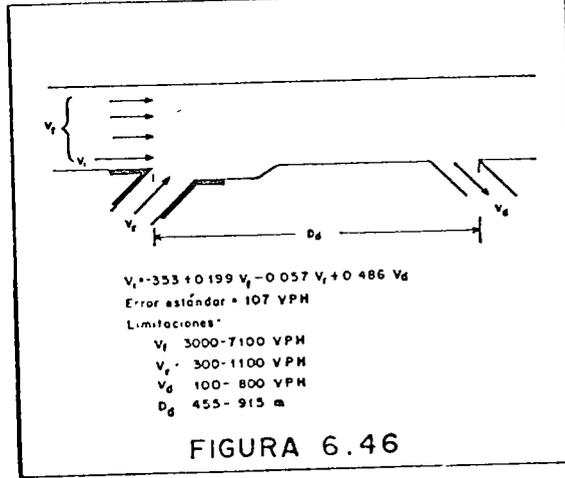
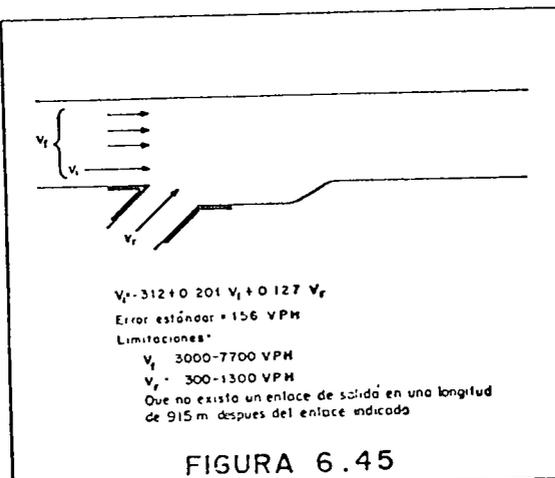
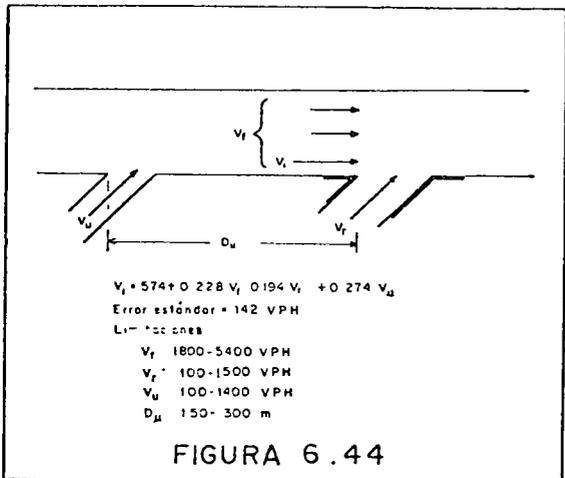
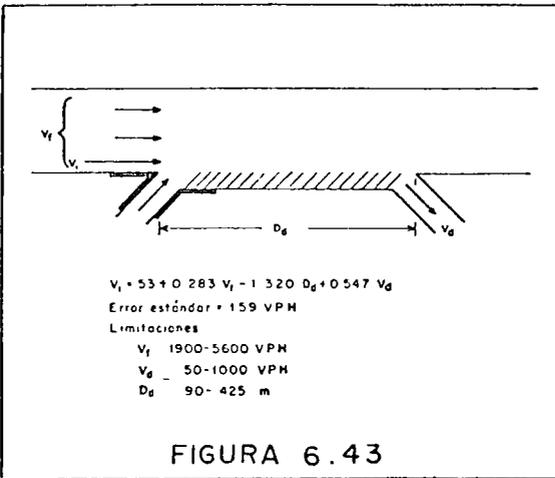
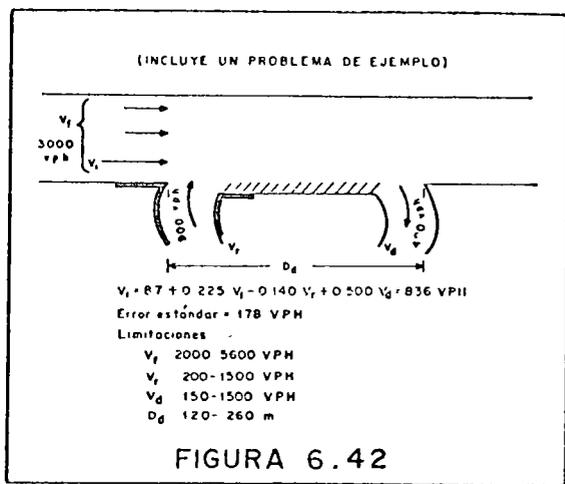
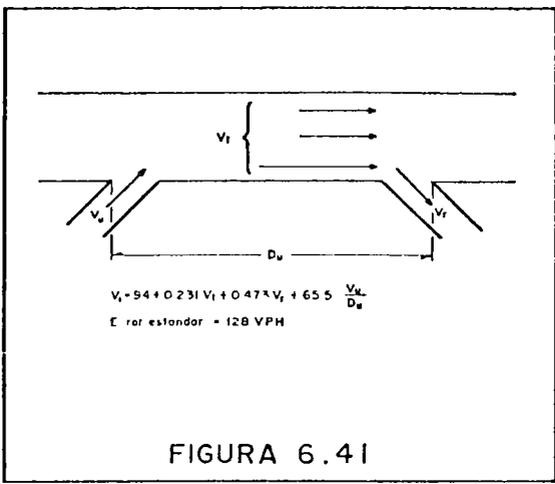


FIGURA 6.40



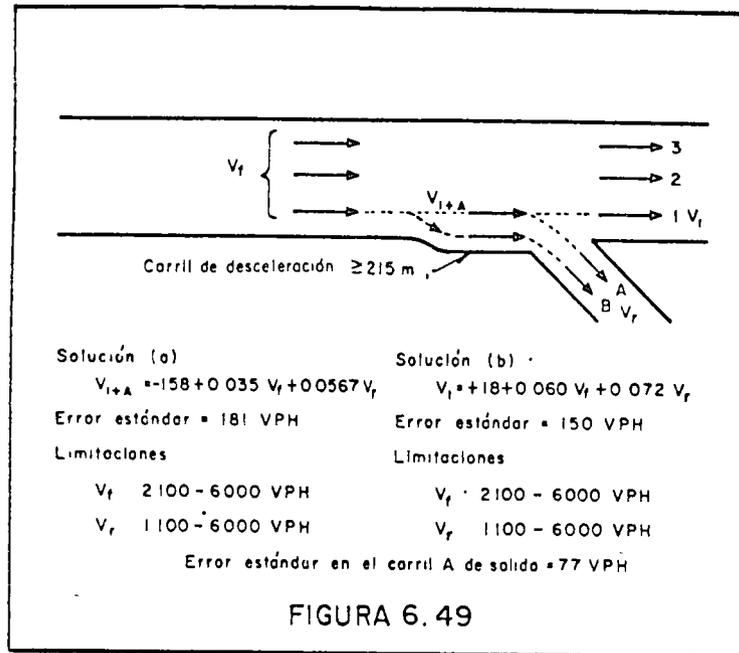


FIGURA 6.49

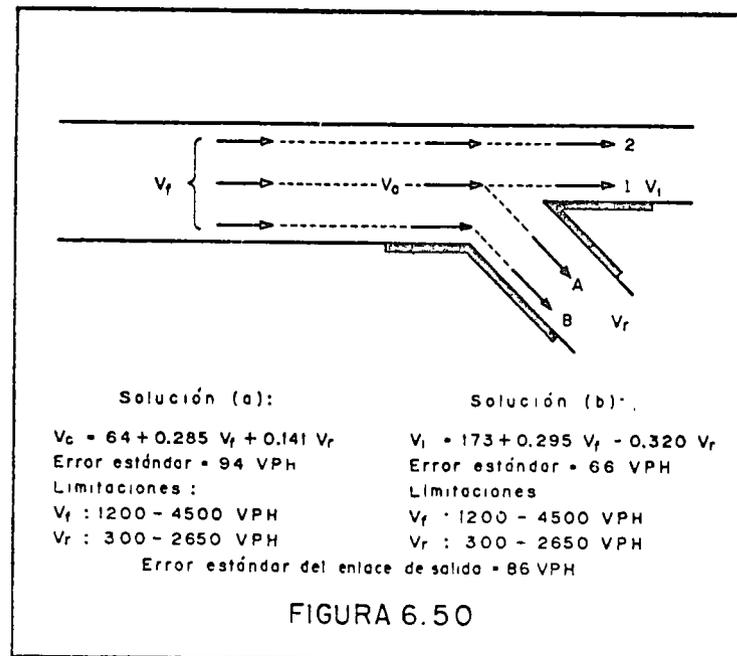


FIGURA 6.50

Volumen en el carril Núm. 1 = vehículos en el carril Núm. 1 que van de paso + vehículos en el carril Núm. 1 provenientes del enlace de entrada, fuera del carril auxiliar (curva superior de la Figura 6.51) + vehículos que usarán el enlace de salida pero que todavía se encuentran en el carril Núm. 1 (deducido de la curva inferior de la Figura 6.51).

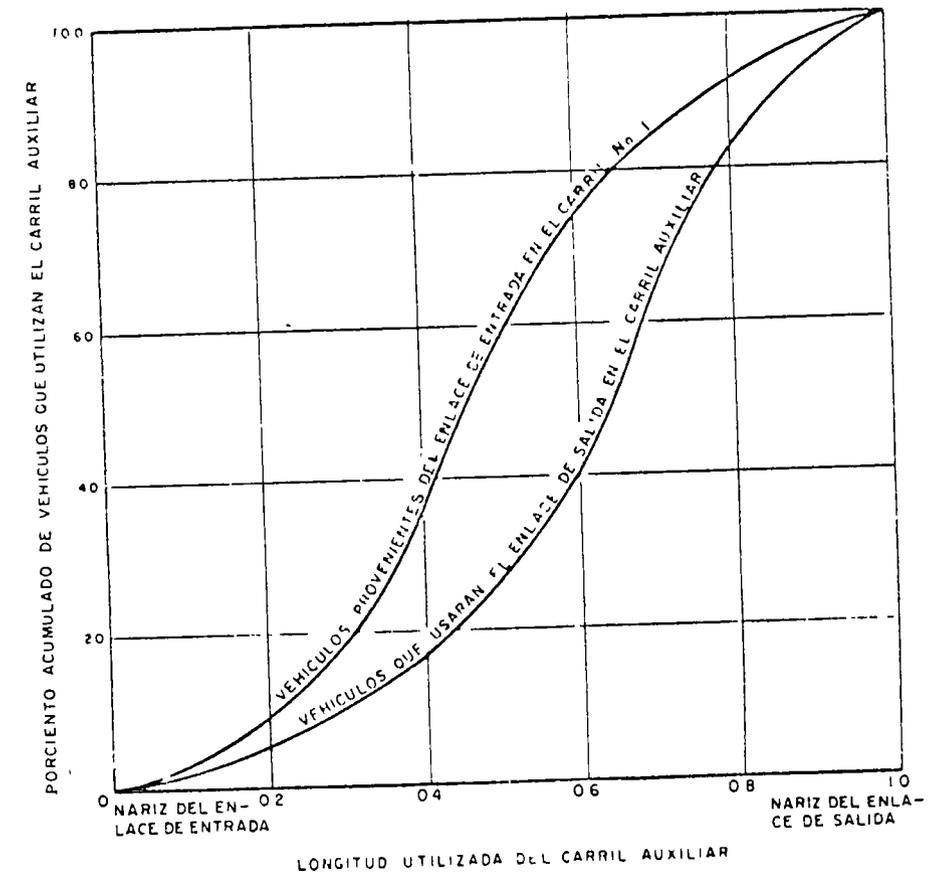


FIGURA 6.51. USO DEL CARRIL AUXILIAR ENTRE ENLACES DE ENTRADA Y SALIDA ADYACENTES

Volumen en el carril auxiliar = vehículos provenientes del enlace de entrada, que todavía se encuentran en el carril auxiliar (deducido de la curva superior de la Figura 6.51) + vehículos que usarán el enlace de salida y que se han movido al carril auxiliar (de la curva inferior de la Figura 6.51).

Usualmente puede determinarse el punto más crítico entre los enlaces, al observar los volúmenes de cada enlace y la forma de las curvas de la Figura 6.51. Al examinar la curva superior, se nota que el movimiento más fuerte que pasa del carril auxiliar al carril Núm. 1 en la distancia disponible, ocurre en el tramo comprendido entre 0.3 y 0.6 de esta distancia.

Asimismo, se puede observar en la curva inferior, que los vehículos que van a salir tienden a permanecer en el carril Núm. 1 hasta una longitud igual a 0.5 de la distancia disponible, después de la cual, se desplazan hacia el carril auxiliar hasta una longitud igual a 0.8 de la distancia. Lo anterior sugiere que la parte más usada del carril Núm. 1 es la comprendida entre 0.5 y 0.6 de la longitud del carril auxiliar. Si la suma del volumen en el carril Núm. 1 y el volumen en el enlace de entrada, no excede al 150 por ciento del volumen de servicio de convergencia indicado en la tabla 6-S, será suficiente, como regla práctica, verificar el volumen en un punto situado a 0.5 de la distancia disponible.

Ajuste por camiones. Los procedimientos descritos están basados en volúmenes de tránsito mixtos con 5% de camiones y condiciones de terreno a nivel; aun cuando no se requieren correcciones cuando el porcentaje de camiones es inferior al 5%, el procedimiento considera un factor de seguridad de 1.10, es decir $1/0.91$, en donde 0.91 corresponde al factor de ajuste para 5% de camiones, obtenido de la tabla 6-H.

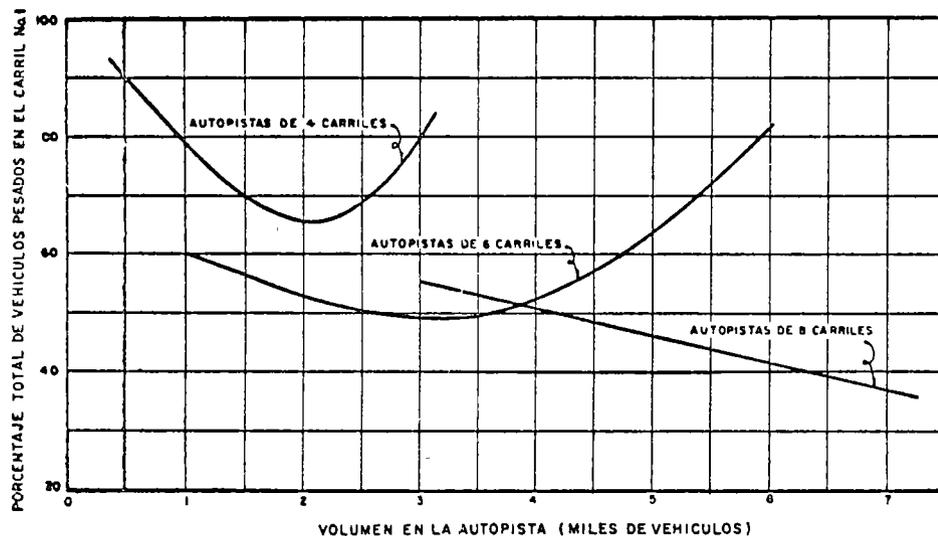


FIGURA 6.52. PORCENTAJE TOTAL DE VEHICULOS PESADOS EN EL CARRIL NUM. 1 DE AUTOPISTAS DE 4, 6 Y 8 CARRILES INMEDIATAMENTE ANTES DE LOS ENLACES DE ENTRADA, O EN EL PUNTO DE DIVERGENCIA INMEDIATAMENTE ANTES DE LOS ENLACES DE SALIDA

Cuando el porcentaje de camiones sea superior, o las pendientes sean importantes, deberá hacerse un ajuste por camiones, el cual se lleva a cabo empleando la Figura 6.52; en esta figura se muestra el porcentaje del total de camiones en un solo sentido, que probablemente circulará por el carril Núm. 1. Con este porcentaje se obtiene el número de camiones en el carril Núm. 1 y, por consiguiente, el por ciento de camiones en función del volumen de tránsito de este mismo carril. Conocido el por ciento de

camiones en el carril Núm. 1, se puede determinar la equivalencia de vehículos ligeros y, por consiguiente, el factor de ajuste, de acuerdo con el procedimiento indicado en el apartado B) del inciso 4.6.1. Multiplicando el volumen en el carril Núm. 1 por el factor 0.91 (factor de ajuste real por camiones), se obtiene el equivalente de vehículos ligeros, quedando implícito en el cálculo, el 5% que se toma como base en el procedimiento.

6.10.3.2 Cálculo de volúmenes de servicio para el nivel D

La tabla 6-T y la Figura 6.53, son los principales elementos que se emplean para reflejar el comportamiento del conductor a un nivel de servicio D. La tabla 6-T da el porcentaje del tránsito de paso que circula en el carril Núm. 1 en las zonas de conexión de los enlaces a un nivel de servicio D, y la Figura 6.53 da los porcentajes del tránsito que van a entrar a la autopista y del tránsito que va a salir, con probabilidad de circular en el carril Núm. 1 en la zona entre enlaces, así como los del tránsito que va a circular en el carril auxiliar en caso de que éste exista.

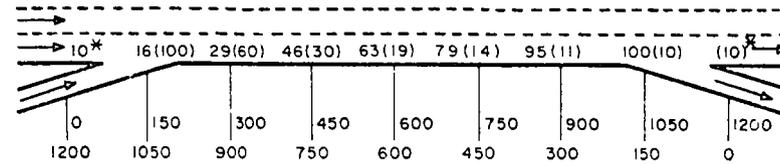
El procedimiento de cálculo es el siguiente:

- Establézcanse las características geométricas del lugar en estudio, incluyendo el número de carriles de la autopista, y los carriles auxiliares en el caso de que existan; ubíquense todos los enlaces comprendidos entre 1 200 m antes y 1 200 m después del enlace o punto de estudio.
- Establézcanse los volúmenes de demanda para todos los movimientos involucrados.

VOLUMEN TOTAL DEL TRANSITO DE PASO, EN UN SENTIDO (V P H)	PORCENTAJE DEL TRANSITO DE PASO QUE CIRCULA EN EL CARRIL N° 1		
	AUTOPISTA DE 8 CARRILES 4 EN CADA SENTIDO	AUTOPISTA DE 6 CARRILES 3 EN CADA SENTIDO	AUTOPISTA DE 4 CARRILES 2 EN CADA SENTIDO
6500 y más	10	—	—
6000 - 6499	10	—	—
5500 - 5999	10	—	—
5000 - 5499	9	—	—
4500 - 4999	9	18	—
4000 - 4499	8	14	—
3500 - 3999	8	10	—
3000 - 3499	8	6	40
2500 - 2999	8	6	35
2000 - 2499	8	6	30
1500 - 1999	8	6	25
Hasta 1499	8	6	20

TABLA 6-T PORCENTAJE DEL TRANSITO DE PASO QUE CIRCULA EN EL CARRIL NUM. 1, EN LAS ZONAS DE CONEXION DE LOS ENLACES A UN NIVEL DE SERVICIO D

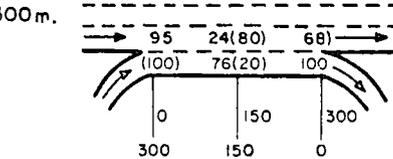
CASO I.- ENLACES DE ENTRADA Y SALIDA DE UN SOLO CARRIL, SIN CARRIL AUXILIAR
(Este croquis puede emplearse independientemente del espaciamiento entre enlaces de entrada y salida, pero como se indica abajo* debe usarse con precaución).



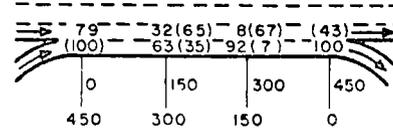
CASO II.- ENLACES DE ENTRADA Y SALIDA DE UN SOLO CARRIL, CON CARRIL AUXILIAR

L = (Longitud del carril auxiliar entre enlaces) = 300m.

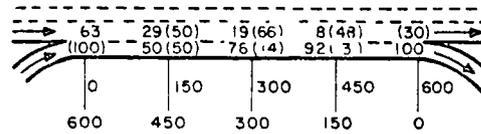
L = 450 m



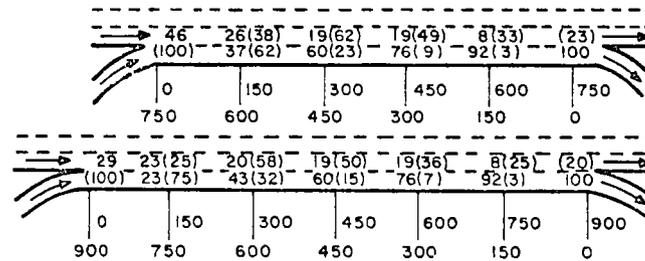
L = 600 m



L = 750 m



L = 900 m



Los valores encerrados en paréntesis indican el porcentaje del tránsito del enlace de entrada en el carril Núm. 1. Los valores que no están encerrados en paréntesis indican el porcentaje del volumen del enlace de salida en el carril Núm. 1. (El tránsito remanente está sobre el carril o carriles a la izquierda del carril Núm. 1)

Estos porcentajes no son necesariamente los correspondientes a condiciones de circulación continua o bajos volúmenes de tránsito en el enlace sino bajo condiciones de altos volúmenes de tránsito en el carril Núm. 1 en el punto a considerar y con espacio libre disponible en los otros carriles

* El porcentaje mínimo en el carril Núm. 1 debe ser igual o mayor que el correspondiente al tránsito de paso en el mismo carril, determinado de la tabla 7-T

FIGURA 6.53. DISTRIBUCION EN POR CIENTO DE LOS TRANSITOS DE LOS ENLACES DE ENTRADA Y SALIDA CON PROBABILIDAD DE CIRCULAR EN EL CARRIL NUM. 1 Y EN EL CARRIL AUXILIAR

c) Determinense los volúmenes por carril en los puntos críticos indicados en la Figura 6.32 y los volúmenes de entrecruzamiento en puntos a cada 150 m; verifiquense estos volúmenes con los valores de control de la tabla 6-S, de la manera siguiente:

1. El volumen de convergencia en cualquier punto del carril Núm. 1, o del carril auxiliar, no debe exceder al valor mostrado en la tabla 6-S, correspondiente al nivel de servicio D; este valor varía entre 1 400 y 1 650 vph, dependiendo del factor de la hora de máxima demanda que se utilice. De manera similar, el volumen de divergencia en un punto sobre el carril Núm. 1 o en un punto sobre el carril auxiliar, no puede exceder al valor mostrado en la tabla 6-S para el nivel D; este valor varía entre 1 500 y 1 750 vph, dependiendo también del factor de la hora de máxima demanda. Los volúmenes en los puntos críticos que se muestran en la Figura 6.32 deberán compararse con estos valores. La Figura 6.53 será de ayuda para determinar dónde existen otros puntos críticos.

2. Para mantener un flujo balanceado, el volumen de tránsito en la autopista, en la zona donde conecta con los enlaces (excluyendo el volumen de los carriles auxiliares en caso de existir), no debe exceder al valor que se da en la tabla 6-S para el nivel de servicio establecido.

3. El volumen de entrecruzamiento no debe exceder de 1 400 a 1 650 vph, en un segmento cualquiera de 150 m dentro de la zona de entrecruzamiento.

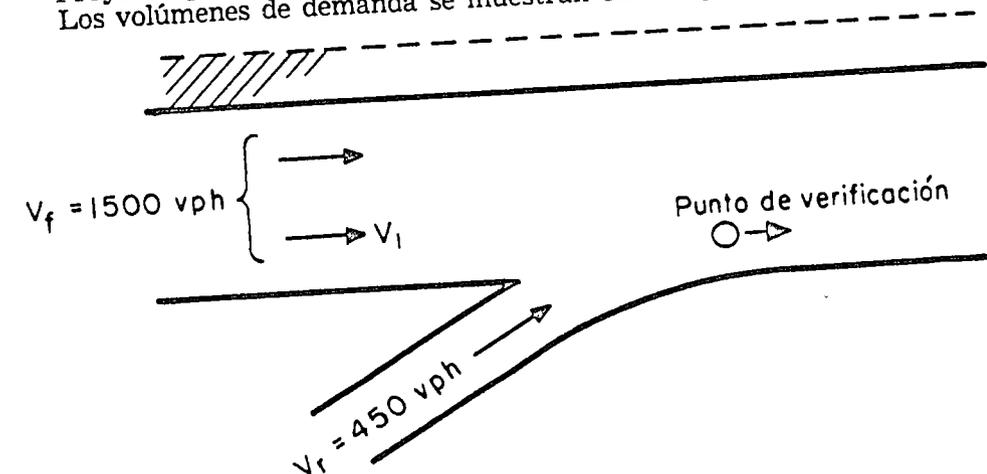
d) Evalúense los resultados obtenidos en el punto c). En caso de no ser satisfactorios, considérense las posibles medidas de corrección.

6.10.4 Solución de ejemplos típicos

Ejemplo 1.

A. Datos:

Conexión de un enlace de entrada de un solo carril con una autopista de 4 carriles, 2 en cada sentido.
Factor de la hora de máxima demanda $FHMD = 0.83$.
Proyecto geométrico con condiciones ideales.
Los volúmenes de demanda se muestran en el siguiente croquis.



B. Determinese:

El nivel de servicio en el punto de convergencia si:

1. Las condiciones son ideales.
2. Existen las siguientes restricciones:

En la autopista:

- Pendiente ascendente del 3% con longitud de 800 m.
- 10% de vehículos pesados.

En el enlace:

- Pendiente ascendente del 4% con longitud de 400 m.
- 4% de vehículos pesados.

C. Solución:

1. Para las condiciones ideales. Usando la ecuación correspondiente al diagrama de la Figura 6.33.

$$V_1 = 136 + 0.345 V_r - 0.115 V_r$$

$$V_1 = 136 + 0.345 (1500) - 0.115 (450)$$

$$V_1 = 602 \text{ vph.}$$

Volumen total en el punto de convergencia:

$$V_1 + V_r = 602 + 450 = 1052 \text{ vph.}$$

Comparando con el volumen de convergencia indicado en la tabla 6-S, se concluye que en el punto de convergencia que se está verificando, la operación corresponde a un nivel de servicio B.

2. Para las restricciones que se plantean.

Conversión del volumen en el carril núm. 1, a vehículos ligeros equivalentes:

De la Figura 6.52, para 1 500 vph en la autopista, el 70% de los vehículos pesados circularán por el carril Núm. 1, es decir, que el número de vehículos pesados en ese carril será 1 500 (0.10) (0.70) = 105 vph.

$$\% \text{ de vehículos pesados} = \frac{\text{Vehículos pesados en carril núm. 1}}{V_1}$$

$$= \frac{105}{602} = 17\%$$

De la tabla 6-F para el 17% de vehículos pesados y 3% de pendiente, en 800 m de longitud, $E_T = 4$.

De la tabla 6-H, para $E_T = 4$ y 17% de camiones, $T_L = 0.67$

$$V_1 = 602 \left(\frac{0.91^{53}}{0.67} \right) = 818 \text{ vehículos ligeros por hora.}$$

** Véase ajuste por camiones, en el inciso 6.10.3.

Conversión del volumen en el enlace V_r , a vehículos ligeros equivalentes:

De la tabla 6-F para 4% de vehículos pesados y 4% de pendiente en 400 m de longitud, $E_T = 10$.

De la tabla 6-H, para $E_T = 10$ y 4% de vehículos pesados, $T_L = 0.74$

$$V_r = 450 \left(\frac{0.91^{54}}{0.74} \right) = 553 \text{ vehículos ligeros por hora.}$$

Volumen total en el punto de convergencia:

$$V_1 + V_r = 818 + 553 = 1371 \text{ vehículos ligeros por hora.}$$

Comparando con el volumen de convergencia indicado en la tabla 6-S para un $FHMD$ de 0.83, se concluye que en el punto de convergencia que se está verificando, la operación corresponde a un nivel de servicio C.

Ejemplo 2.

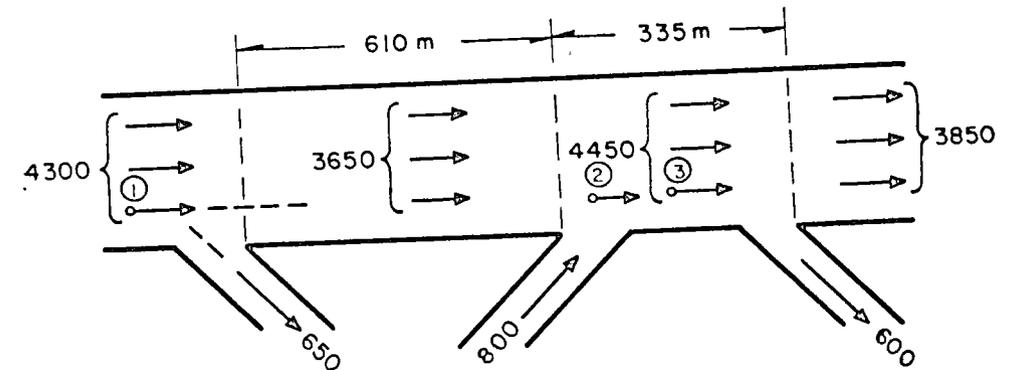
A. Datos:

Autopista de 6 carriles, 3 en cada sentido.

Factor de la hora de máxima demanda $FHMD = 0.91$.

Proyecto geométrico con condiciones ideales.

Volúmenes de demanda (véase croquis).



B. Determinese:

1. Si los volúmenes en los puntos marcados con un número dentro de un círculo operan a un nivel C.
2. Si el volumen de demanda en la autopista es menor que el valor límite del volumen de servicio para un nivel C.
3. Si los volúmenes de entrecruzamiento entre los enlaces de entrada y salida cumplen con los volúmenes de servicio de entrecruzamiento al nivel C, de la tabla 6-S.
4. Si no se cumple con el nivel de servicio C, rediseñese para lograr el nivel mencionado.

** Véase ajuste por camiones, en el inciso 6.10.3.

C. Solución:

1. Evaluando los condiciones dadas, conviene emplear la Figura 6.41 para divergencias y la Figura 6.40 para convergencias.

Verificación del primer punto de divergencia:

Utilizando la ecuación de la Figura 6.41.

$$V_1 = 94 + 0.231 V_t + 0.473 V_r + 65.5 \left(\frac{V_u}{D_u} \right)$$

$$V_t = 4\ 300 \text{ vph}$$

$$V_r = 650 \text{ vph}$$

$$V_u = 0; D_u = 0$$

Substituyendo:

$$V_1 = 94 + 0.231 (4\ 300) + 0.473 (650) + 65.5 (0)$$

$$V_1 = 1\ 395 \text{ vph}$$

De la tabla 6-S para un nivel C y $FHMD = 0.91$, en el punto de divergencia el volumen de servicio es de 1 650 vph.

Como $1\ 395 \text{ vph} < 1\ 650 \text{ vph}$, se cumplen los requerimientos del nivel C y las condiciones son satisfactorias.

Verificación del segundo punto de divergencia:

Utilizando la misma ecuación de la Figura 6.41.

$$V_t = 4\ 450 \text{ vph}$$

$$V_r = 600 \text{ vph}$$

$$V_u = 800 \text{ vph}$$

$$D_u = 335 \text{ vph}$$

Substituyendo:

$$V_1 = 94 + 0.231 (4\ 450) + 0.473 (600) + 65.5 \left(\frac{800}{335} \right)$$

$$V_1 = 1\ 562 \text{ vph}$$

Como $1\ 562 \text{ vph} < 1\ 650 \text{ vph}$, se cumplen los requerimientos del nivel C y las condiciones son satisfactorias.

Verificación del punto de convergencia:

Utilizando la ecuación de la Figura 6.40.

$$V_1 = -121 + 0.244 V_t - 0.085 V_u + 195 \left(\frac{V_d}{D_d} \right)$$

$$V_t = 3\ 650 \text{ vph}$$

$$V_u = 650 \text{ vph}$$

$$V_d = 600 \text{ vph}$$

$$D_d = 335 \text{ m}$$

Substituyendo:

$$V_1 = -121 + 0.244 (3\ 650) - 0.085 (650) + 195 \left(\frac{800}{335} \right)$$

$$V_1 = 1\ 064 \text{ vph}$$

Total en el punto de convergencia 1 064 vph (V_1 en el carril Núm. 1, a la altura de la nariz del enlace) + 800 vph (volumen entrando por el enlace) = 1 864 vph.

De la tabla 6-S, el volumen de servicio para convergencia a un nivel C y un $FHMD$ de 0.91, es de 1 550 vph.

$$1\ 550 \text{ vph} < 1\ 864 \text{ vph.}$$

Como el volumen de convergencia es considerablemente mayor que el volumen de servicio al nivel C, no se cumple con los requisitos de operación planteados.

2. Verificación del nivel de servicio C, en los carriles de la autopista.

$$4\ 300 \text{ vph} < 4\ 350 \text{ vph (de la tabla 6-S); aceptable}$$

$$3\ 650 \text{ vph} < 4\ 350 \text{ vph (de la tabla 6-S); aceptable}$$

$$4\ 450 \text{ vph} > 4\ 350 \text{ vph (de la tabla 6-S); no aceptable.}$$

3. Verificación del entrecruzamiento.

800 vph entrando + 600 vph saliendo = 1 400 vph, que entrecruzan en una longitud de 335 m. Obviamente se encuentra en un nivel de servicio C si se compara con el volumen de entrecruzamiento de la tabla 6-S, la cual indica un máximo de 1 350 vph entrecruzándose en una longitud de 150 m; por consiguiente, las condiciones son satisfactorias.

Los análisis anteriores indican que la geometría propuesta es deficiente en el punto de convergencia y en los carriles de la autopista entre los enlaces de entrada y salida.

4. Proposiciones de modificación al diseño, para mejorar la operación en los puntos que no cumplen con el nivel de servicio C.

La modificación apropiada para cumplir con los requerimientos del nivel C, consiste en aumentar un carril entre los enlaces de entrada y salida, con el fin de proporcionar un espacio adicional de maniobra y reducir el número de vehículos en el carril Núm. 1.

Esto no cambiará la operación en el primer enlace de salida, por lo cual no será necesario revisarlo.

Con esta modificación, deberá hacerse una verificación del volumen en el carril Núm. 1, en el carril auxiliar y en la autopista, además de la verificación del entrecruzamiento.

Verificación sobre el carril Núm. 1. Para la verificación, es apropiado el empleo de la ecuación de la Figura 6.43.

$$V_1 = 53 + 0.283 V_t - 1.320 D_d + 0.547 V_d$$

V_t , D_d y V_d , son los mismos valores utilizados en la primera parte del problema.

Substituyendo:

$$V_1 = 53 + 0.283 (3\ 650) - 1.320 (335) + 0.547 (600)$$

$$V_1 = 972 \text{ vph}$$

Para propósitos de análisis, se considera que el 100% de los vehículos que van a salir, circulan en el carril Núm. 1 desde el enlace de entrada.

Volumen en el carril Núm. 1 que va de paso = V_1 (calculado con la ecuación) — V_r (que utilizará el enlace de salida), de donde:

Volumen en el carril Núm. 1 que va de paso = $972 - 600 = 372 \text{ vph}$.

Aplicación de la regla práctica.

Si la suma del volumen en el carril Núm. 1 más el volumen en el enlace de entrada no excede al 150% del volumen de servicio de convergencia, será suficiente verificar el volumen en un punto a 0.5 de la distancia disponible.

Volumen en el carril número 1	=	972 vph
Volumen en el enlace de entrada	=	800 vph
		1 772 vph

Volumen de convergencia para $FHMD$ de 0.91 = 1 550 (de la tabla 6-S).
150% del volumen de convergencia = $1\ 550 \times 1.5 = 2\ 325 \text{ vph}$.

Como $1\ 172 \text{ vph} < 2\ 325 \text{ vph}$, se puede aplicar la regla práctica.

Volumen a 0.5 de la distancia disponible:

V_1 (a 0.5 de la distancia disponible) = vehículos en el carril Núm. 1 que van de paso + vehículos en el carril Núm. 1 provenientes del enlace de entrada + vehículos que usarán el enlace de salida pero que todavía se encuentran en el carril Núm. 1.

Vehículos en el carril Núm. 1 que van de paso = 372 vph.

Vehículos en el carril Núm. 1 provenientes del enlace de entrada = $0.58 \times 800 = 464 \text{ vph}$ (curva superior de la Figura 6.51).

Vehículos que usarán el enlace de salida pero que todavía se encuentran en el carril Núm. 1 = $(1.00 - 0.25) \times 600 = 450 \text{ vph}$ (deducido de la curva inferior de la Figura 6.51).

V_1 (a 0.5 de la distancia disponible) = 372 vph de paso + 464 vph de entrada + 450 vph de salida = 1 286 vph.

Como el punto está situado a la mitad de la distancia entre enlaces, la comparación se hace con el volumen de servicio de convergencia.

1 286 vph (volumen de demanda a 0.5 de la distancia) < 1 550 vph (volumen de servicio de convergencia al nivel C).

Conclusión: Se satisfacen los requerimientos para el nivel de servicio C.

Verificación sobre el carril auxiliar:

El volumen en el carril auxiliar puede calcularse utilizando la Figura 6.51 o bien simplificando, si se suma al volumen en el carril Núm. 1 (a la altura de la nariz del enlace de entrada) el volumen en el enlace de entrada y se resta el volumen calculado en el carril Núm. 1 para el punto a 0.5 de la distancia.

972 vph (en la nariz) + 800 vph (en la entrada) - 1 286 vph (a 0.5 de la distancia) = 486 vph.

Comparando con el volumen de servicio de convergencia:

486 vph (volumen de demanda en el carril auxiliar a 0.5 de la distancia) < 1 550 vph (volumen de servicio de convergencia al nivel C).

Conclusión: Se satisfacen los requerimientos para el nivel de servicio C.

Verificación en los carriles de la autopista:

A 0.5 de la distancia, el volumen de demanda en la autopista, descontando el volumen en el carril auxiliar, es: $4\ 450 \text{ vph}$ (en los carriles de la autopista) - 486 vph (en el carril auxiliar) = $3\ 964 \text{ vph}$.

Comparando con el volumen de servicio (de la tabla 6-S), $3\ 964 \text{ vph}$ (volumen de demanda) < $4\ 350 \text{ vph}$ (volumen de servicio al nivel C).

Conclusión: Se satisfacen los requerimientos para el nivel de servicio C.

Verificación del entrecruzamiento:

El entrecruzamiento de 1 400 vph ($800 + 600$) en 335 m parece satisfactorio, al compararlo con el volumen de servicio de entrecruzamiento de 1 350 vph en 150 m, para el nivel C y $FHMD$ de 0.91 indicado en la tabla 6-S; sin embargo, es conveniente una verificación del entrecruzamiento en la zona intermedia.

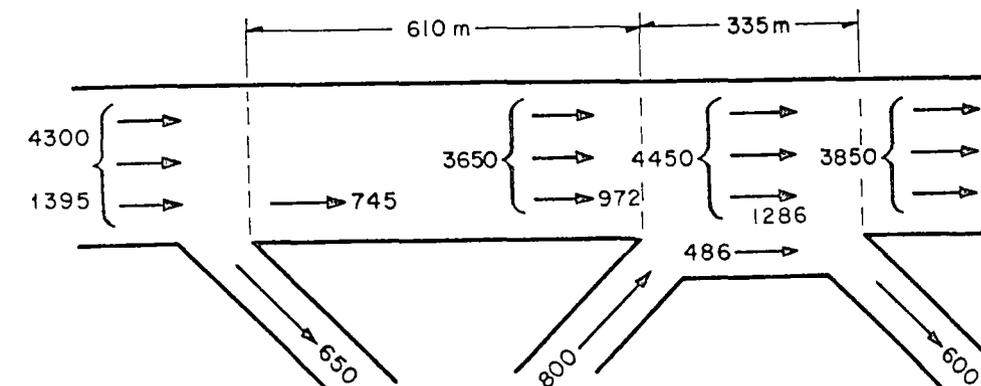
Volumen en el carril Núm. 1 proveniente del enlace de entrada = 464 vph.

Volumen en el carril auxiliar que usará el enlace de salida ($600 - 450$) = 150 vph.

Volumen entrecruzándose a 0.5 de la distancia = $464 + 150 = 614 \text{ vph}$.

El valor anterior es considerablemente menor que el volumen de entrecruzamiento de 1 350 vph para 150 m de la tabla 6-S, por lo que se satisfacen los requerimientos para el nivel de servicio C.

A continuación, se muestra el croquis indicando las modificaciones al diseño y los volúmenes probables para cumplir con el nivel de servicio C especificado.



Ejemplo 3.

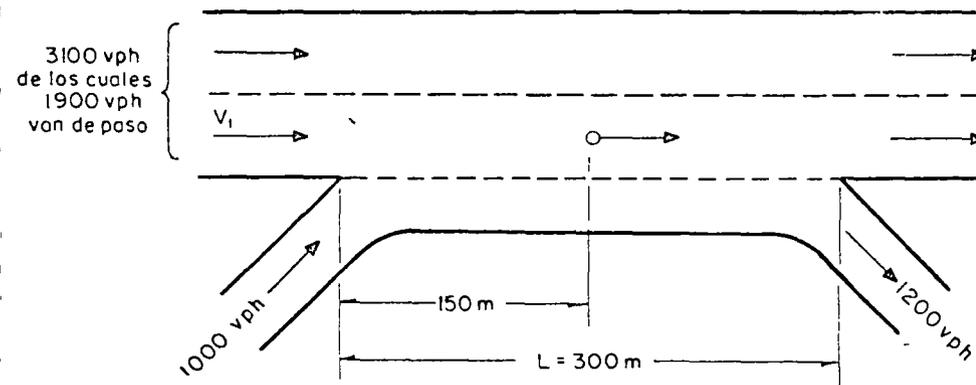
A. Datos:

Subtramo de autopista de 4 carriles, 2 en cada sentido, comprendido entre un enlace de entrada y un enlace de salida, con un carril auxiliar entre ellos.

Condiciones ideales, tanto geométricas como del tránsito.

Factor de la hora de máxima demanda = 0.91.

Los volúmenes de demanda se muestran en el siguiente croquis.



B. Determinése:

Si el subtramo entre enlaces cumple con los requisitos de un nivel de servicio D.

C. Solución:

Verificación del volumen de tránsito en el carril Núm. 1, a 0.5 de la distancia entre enlaces.

Tránsito de paso en el carril Núm. 1 = $0.25 \times 1900 = 475$ vph (de la tabla 6-T).

Tránsito en el carril Núm. 1, proveniente del enlace de entrada = $0.80 \times 1000 = 800$ vph (de la Figura 6.53).

Tránsito en el carril Núm. 1, que utilizará el enlace de salida = $0.24 \times 1200 = 288$ vph (de la Figura 6.53).

Volumen total en el carril Núm. 1, a 0.5 de la distancia entre enlaces = $475 + 800 + 288 = 1563$ vph.

Comparando con el volumen de convergencia de la tabla 6-S para el nivel de servicio D y $FHMD = 0.91$.

1563 vph (volumen de demanda) < 1650 vph (volumen de convergencia al nivel D).

La comparación indica que sí se cumple con el nivel de servicio D, en el punto situado a la mitad de la distancia entre enlaces.

Verificación del entrecruzamiento entre enlaces:

En la Figura 6.53 se observa que el 80% del tránsito que proviene del enlace de entrada, se entrecruza con el 76% del tránsito que utilizará el enlace de salida; el volumen de entrecruzamiento será el siguiente:

Volumen de entrecruzamiento = $0.80 \times 1000 + 0.76 \times 1200 = 1712$ vph.

Comparando con el volumen de entrecruzamiento a cada 150 m indicado en la tabla 6-S para el nivel de servicio D y $FHMD = 0.91$.

1650 vph < 1712 vph (VSD).

Como el volumen de servicio es un poco menor que el de demanda, es probable que ocurran algunas turbulencias en el flujo de tránsito. Este ejemplo ilustra lo indeseable que resulta tener volúmenes de tránsito altos, en enlaces sucesivos de entrada y de salida, espaciados a distancias tan cortas, aun cuando se proporcione un carril auxiliar entre ellos.

6.11 ANALISIS DE CAPACIDAD Y VOLUMENES DE SERVICIO EN INTERSECCIONES A NIVEL CONTROLADAS CON SEMAFOROS

La intersección a nivel es uno de los elementos más importantes del sistema vial, que limitan y a menudo interrumpen la circulación del tránsito.

La cantidad de vehículos que puede pasar a través de una intersección, depende de las características geométricas y de operación de los caminos, de la influencia que tienen las condiciones ambientales sobre la experiencia y acciones del conductor, de las características de la corriente del tránsito y de las medidas para el control del tránsito.

6.11.1 Factores que afectan la capacidad y los niveles de servicio en una intersección a nivel

A) Características físicas y de operación.

1. Anchura del acceso. La anchura del acceso, más bien que el número de carriles, es el elemento con mayor influencia en la capacidad. Por consiguiente, los procedimientos que se describen en este inciso, están basados en las anchuras de los accesos y no en el número de carriles. Entendiéndose por acceso la parte de la rama utilizada por el tránsito que llega a la intersección.

2. Estacionamiento. Debido a que el estacionamiento en un acceso tiene un efecto muy pronunciado en la capacidad, se considera que su presencia o su ausencia es una condición básica que debe ser definida desde un principio, antes que se haga la evaluación de otros factores, ya que la eliminación del estacionamiento proporciona un incremento considerable de la capacidad. Si se suprime el estacionamiento en uno o en ambos lados de un acceso, la capacidad deberá evaluarse para cada condición.

La condición "Sin estacionamiento", se refiere a que no hay vehículos que permanezcan o se detengan en el acceso, a excepción del ascenso y descenso ocasional de pasajeros. "Con estacionamiento", significa que los vehículos permanecen o se detienen durante cierto período de tiempo en el acceso.

Como regla práctica, se considera que aquellos accesos en donde se permite estacionarse a menos de 75 m de la intersección, deberán considerarse dentro del grupo "Con estacionamiento".

3. Operación en uno o en dos sentidos. Existen, obviamente, diferencias importantes entre la operación en un sentido y la operación en dos

sentidos, las cuales se reflejan en la capacidad y en los volúmenes de servicio que pueden alcanzarse. Por ejemplo, en los accesos de calles con un sentido de circulación, las vueltas a la izquierda pueden hacerse con más facilidad, debido a la ausencia de tránsito en sentido contrario. Cuando las calles transversales son también de un sentido, los conflictos ocasionados por movimientos de vuelta, son menores que si hubiera dos sentidos.

Debido a las diferencias antes señaladas, los procedimientos de análisis y los factores de ajuste para estas dos condiciones se llevan a cabo por separado.

B) Condiciones ambientales. Los factores por condiciones ambientales representan aquellas características de la demanda, que se reflejan en la corriente del tránsito, las cuales no pueden cambiarse aunque se modifique el proyecto, o se alteren los dispositivos de control de la intersección. Estos factores incluyen: el factor de carga, el factor de la hora de máxima demanda, la población del área metropolitana y la ubicación dentro de la ciudad.

1. Factor de carga. El factor de carga es una medida del grado de utilización del acceso a una intersección, durante una hora de flujo máximo. Es la relación entre el número de fases verdes que están cargadas, o totalmente utilizadas por el tránsito (usualmente durante la hora máxima), y el número total de fases verdes disponibles para ese acceso durante el mismo período de tiempo. Como tal, es también una medida del nivel de servicio en el acceso, según se explicará en páginas subsecuentes.

El término "fase cargada" se usa con frecuencia para describir el grado de utilización del acceso de una intersección. Puede considerarse que la fase de luz verde de un acceso está cargada, cuando se tienen las siguientes condiciones: a) hay vehículos en todos los carriles, listos para cruzar la intersección cuando se prenda la luz verde y b) mientras sigue prendida la luz verde, siguen entrando vehículos a la intersección, sin tiempo desperdiciado o espaciamentos demasiado largos entre vehículos, debido a la ausencia de tránsito, ya sea que esta ausencia se deba a la falta de demanda o a interferencias y fricciones antes de la intersección.

2. Factor de la hora de máxima demanda. Normalmente, las variaciones de la demanda dentro de una hora pueden producir el arribo de volúmenes máximos en períodos cortos de tiempo durante la hora, los cuales exceden considerablemente al promedio. Este elemento debe tomarse en consideración con el fin de asegurar que no se formen colas largas de vehículos, durante ciertos períodos de la hora, aun cuando la capacidad en la hora no sea excedida.

3. Población del área metropolitana. Se ha observado que los accesos a intersecciones ubicadas en ciudades grandes, tienen mayor capacidad que los accesos a intersecciones con características geométricas similares, ubicadas en ciudades más pequeñas.

En general, lo anterior probablemente se deba a que los conductores en ciudades muy populosas tienen más experiencia con situaciones de altas densidades y congestionamientos de tránsito, que aquellos que operan en ciudades más pequeñas. En el procedimiento de análisis para determinar la capacidad y los volúmenes de servicio, se incluyen nueve grupos que abarcan un rango muy amplio del tamaño de la población, dependiendo del número de habitantes.

Por conveniencia, en la solución de problemas, el efecto del número de habitantes del área metropolitana y el del factor de la hora de máxima demanda, se han combinado en un solo factor de ajuste.

4. Ubicación de la intersección dentro del área metropolitana. Para propósitos de análisis, se considera que dependiendo de la ubicación de la intersección dentro del área metropolitana, el efecto es distinto sobre la capacidad de la intersección. En el procedimiento de análisis, se incluyen factores de ajuste para cuatro diferentes condiciones de la ubicación, a saber: zona comercial en el centro de la ciudad; zona circundante al centro de la ciudad, donde existen entre otras cosas bodegas de almacenes, industria ligera y núcleos con alta densidad de población; zona comercial fuera del centro; y zona residencial.

C) Características del tránsito.

1. Movimientos de vuelta. No obstante que los movimientos de vuelta están directamente relacionados con las características del tránsito, éstos pueden ser controlados con frecuencia en forma deliberada. Algunos movimientos en intersecciones aisladas pueden eliminarse totalmente, o bien, estudiarse con las técnicas de la Ingeniería de Tránsito, con el fin de lograr un incremento de la capacidad.

Debido al gran número de interrelaciones de los movimientos de vuelta con otros movimientos del tránsito y de los peatones en el área de la intersección, muchas de las cuales no se han estudiado en detalle, no es posible aún establecer un criterio definido, sobre el efecto que se tiene con esos movimientos.

a) A continuación se incluye una lista de las características de los efectos sobre la capacidad de los movimientos de vuelta a la izquierda, los cuales han sido tomados como base para determinar los factores de ajuste que se emplean en los procedimientos de cálculo.

— El efecto por vehículo en el acceso de una intersección es menor, cuando dos o más vehículos sucesivos dan vuelta a la izquierda, que cuando vehículos aislados efectúan ese mismo movimiento.

— En calles de dos sentidos, el efecto de los vehículos que dan vuelta a la izquierda se relaciona con el número de vehículos que circulan en sentido contrario.

— El efecto de una vuelta a la izquierda está relacionado con los conflictos que ocasiona la circulación de peatones.

— Un vehículo esperando para efectuar una vuelta a la izquierda causa una reducción de capacidad más grande en una calle estrecha que en una calle ancha o en una que tenga una isleta separadora, con un carril especial para dar vuelta a la izquierda.

— La anchura de la calle transversal afecta a la velocidad de los vehículos que dan vuelta. En una calle ancha, las velocidades son más altas, debido a que los radios de giro son mayores y hay más espacio para alojar a los vehículos que dan vuelta a la izquierda.

b) Las vueltas a la derecha influyen también en la capacidad, dependiendo de las condiciones en la intersección. Aun cuando en este caso el tránsito en sentido contrario no tiene ningún efecto, las influencias son muy parecidas a las de las vueltas a la izquierda, y son:

— Dos o más vehículos sucesivos dando vuelta, tienen mayor efecto que si dieran la vuelta aisladamente.

— Los movimientos de vuelta a la derecha se ven afectados por los movimientos de peatones. Algunas veces, el efecto es mayor que en el caso de vueltas a la izquierda, debido a que el conflicto se produce a menudo con grupos grandes de peatones que intentan cruzar la calle.

— Un vehículo que da vuelta a la derecha causa una reducción de la capacidad, más grande en una calle ancha que en una calle estrecha.

— La influencia de la anchura de la calle transversal angosta puede ser mayor para vueltas a la derecha que para vueltas a la izquierda, debido a que el radio de giro disponible es menor. Por otra parte, cuando la interferencia de peatones es pequeña y existe un radio de giro adecuado, o donde se permite la vuelta continua a la derecha, existe un aumento en la capacidad al incrementarse el número de vueltas a la derecha, particularmente cuando la calle transversal es ancha y los vehículos que dan vuelta a la derecha libran la intersección más rápidamente que los vehículos que van de frente.

2. Vehículos pesados. Para propósitos de análisis, dentro de esta categoría quedan comprendidos los camiones y autobuses foráneos.

La presencia de vehículos pesados tiende a reducir las capacidades de los accesos de una intersección, debido a que aceleran más lentamente, además de ocupar mayor espacio que los vehículos ligeros. La magnitud del efecto es muy variable, dependiendo del tipo de vehículos, de su relación peso-potencia y en particular, de su tamaño y de su radio de giro.

Sin embargo, debido a que existen pocas investigaciones detalladas en este campo, en los procedimientos de cálculo se proporcionan únicamente factores de ajuste aproximados.

3. Autobuses urbanos. Los autobuses urbanos tienen un efecto completamente diferente sobre la capacidad de las calles de la ciudad que el producido por los autobuses foráneos, considerados como camiones.

El efecto específico que los autobuses urbanos tienen sobre la capacidad de una intersección en particular, depende de la zona de la ciudad en donde se encuentre ubicada la intersección, del ancho de la calle, de las condiciones de estacionamiento, del número de autobuses y de la ubicación de la parada de autobuses.

En general, cuando el volumen de autobuses urbanos es apreciable, las paradas de autobuses localizadas en la esquina antes de llegar a la intersección, tendrán un efecto más desfavorable en la capacidad, que una parada ubicada pasando la intersección. En los procedimientos de cálculo que se indican en las siguientes páginas, se incluyen los métodos para hacer los ajustes necesarios, en las dos condiciones antes mencionadas.

D) Medidas de control. Estas incluyen:

1. Semáforos. El semáforo ordinario regula la circulación del tránsito, a través de la siguiente secuencia de indicaciones: luz verde (siga), luz ámbar (preventiva), y luz roja (alto). En el caso más simple, los tiempos de duración de cada una de las indicaciones de la secuencia es fija, no existiendo interconexión con otros semáforos. Por otra parte, en instalaciones complejas, cada movimiento puede ser gobernado por su propia serie específica de indicaciones; el tiempo de duración de cada indicación puede ser variable y el semáforo probablemente esté interconectado con otros semáforos.

Prácticamente, cualquier semáforo —desplega indicaciones— de luz roja, durante las cuales los vehículos dejan de circular. Obviamente, estos períodos de rojo reducen la cantidad de tránsito que puede pasar por el acceso de una intersección durante una hora, en proporción aproximada al porcentaje del tiempo total. Por consiguiente "vehículos por hora", refiriéndose a la hora efectiva, no es una medida adecuada de la circulación, en una intersección controlada con semáforo. La medida normalmente usada es "vehículos por hora de luz verde del semáforo".

La influencia principal de un semáforo en la capacidad de un acceso particular, en términos de vehículos por hora de luz verde, radica en el grado en el cual detiene a los vehículos en movimiento. Por una parte, si todos los vehículos haciendo uso del acceso son detenidos antes de entrar en la intersección, como puede ocurrir en un semáforo aislado, muy difícilmente pueden pasar a través de la intersección más de 1500 vehículos por hora de luz verde, por carril. Por otra parte, si ningún vehículo es detenido, como puede ser el caso de un sistema debidamente sincronizado, puede obtenerse una capacidad de 2000 vehículos por hora de luz verde, por carril. Los volúmenes por hora efectiva serán, desde luego, menores en ambos casos.

Los procedimientos de cálculo que se dan en este inciso, son aplicables a intersecciones aisladas con semáforos, considerando que existe cierto grado de coordinación con los semáforos de otras intersecciones.

a) Programación del semáforo. El tiempo que se proporciona a cada una de las indicaciones de luz del semáforo en una intersección simple, tiene una gran influencia en el número de vehículos que puede alojar cada uno de los accesos de la misma. No obstante que el elemento de cálculo que se usa en el análisis, es la parte de la hora en que el semáforo está en luz verde para el acceso en estudio, deben considerarse otros aspectos de la programación que afectan a la capacidad.

b) Longitud del ciclo. Es el tiempo total requerido para una secuencia completa de las indicaciones de luz del semáforo (verde + ámbar + rojo). En general, la longitud del ciclo deberá mantenerse tan corta como sea posible, sin dejar de satisfacer la demanda de cada uno de los movimientos vehiculares necesarios para la operación total de la intersección. Las longitudes típicas del ciclo durante períodos fuera de los máximos, varían entre 50 y 60 seg. Rara vez es factible operar con longitudes del ciclo menores de 40 segundos o con tiempos de luz verde para movimientos individuales menores de 15 segundos. Longitudes del ciclo mayores de 60 segundos se requieren a veces para acomodar movimientos múltiples en intersecciones complicadas, con el fin de proporcionar tiempos de luz verde más largos en aquellos accesos con volúmenes de tránsito altos, o para operar varias intersecciones simultáneamente. Sin embargo, los ciclos largos tienden a incrementar la demora total en la intersección (principalmente al formarse colas demasiado largas en la calle secundaria).

La máxima eficiencia se logra fundamentalmente con la menor longitud posible del ciclo. En la práctica, sin embargo, puede llegar en algunos casos a ser bastante largo, lo que hace necesario hacer un análisis cuidadoso para elegir la longitud del ciclo y la división del mismo, de manera tal, que se logre una utilización balanceada y efectiva del tiempo de luz verde en todos los accesos.

c) Relación tiempo de luz verde al ciclo (relación G/C). Este es un factor importante que se emplea en el cálculo de la capacidad, para convertir vehículos por hora de luz verde, a vehículos por hora efectiva. Con excepción de los semáforos accionados por el tránsito, la longitud del ciclo y/o la división del mismo, no sufre modificaciones dentro de los periodos máximos, de tal manera que el intervalo de luz verde para una fase cualquiera dividido por la longitud del ciclo, proporciona la relación G/C , para los vehículos del acceso que se mueven durante ese intervalo.

2. Número de carriles por acceso. Como ya se mencionó con anterioridad, el ancho del acceso ha probado tener mayor influencia en la capacidad, que el número de carriles; sin embargo, se han determinado algunas relaciones entre el número de carriles y la capacidad.

En la siguiente tabla se indica el número de carriles necesarios de acuerdo con el ancho del acceso, para alojar volúmenes óptimos de tránsito.

Ancho del acceso en metros	Núm. de carriles
Hasta 5.00	1
5.50 a 7.50	2
8.00 a 12.00	3
12.50 a 16.50	4

6.11.2 Capacidad, volúmenes de servicio y niveles de servicio

Aunque para la mayor parte de los elementos de un camino se emplea la velocidad de los vehículos como una medida del nivel de servicio, tratándose de intersecciones a nivel con semáforos, su uso es poco práctico, debido a que estos dispositivos provocan altos intencionalmente. En este tipo de intersecciones, la mejor medida para el nivel de servicio es el factor de carga, por ser éste el más evidente para el conductor promedio.

Las condiciones de operación en este tipo de intersecciones para cada nivel de servicio son las siguientes:

En el nivel de servicio A, no hay fases cargadas (el factor de carga es 0.0) y sólo unas cuantas fases se acercan a esta condición. Ninguna fase del acceso es totalmente utilizada por el tránsito y no hay vehículos que esperen más de una indicación de luz roja del semáforo.

En el nivel de servicio B, la operación es estable, con un factor de carga no mayor de 0.1; ocasionalmente se utiliza totalmente una fase del acceso y un número importante de éstas se aproxima a la utilización total.

En el nivel de servicio C, continúa la operación estable. La carga de las fases es todavía intermitente, aunque más frecuente, con factores de carga que varían entre 0.1 y 0.3. Ocasionalmente algunos conductores tendrán que esperar más de una indicación de luz roja, pudiendo formarse algunas colas de los vehículos que van a dar vuelta. Muchos conductores se sienten restringidos en cierto modo, pero sin presentar objeciones. Este es el nivel de servicio que normalmente se utiliza para fines de proyecto en zonas urbanas.

En el nivel de servicio D, las restricciones son cada vez mayores, aproximándose a la inestabilidad en los límites donde el factor de carga alcanza el valor de 0.70. Las demoras de los vehículos que se aproximan pueden ser mayores durante cortos periodos dentro del periodo máximo, pero ocurren suficientes ciclos con poca demanda que permiten la disipación de colas.

En el nivel de servicio E, se alcanza la capacidad o sea, el mayor número de vehículos que puede alojar cualquier acceso de la intersección. Aun cuando teóricamente la capacidad equivale a tener un factor de carga de 1.0, en la práctica rara vez se produce una total utilización de las fases. Un factor de carga de 0.7 a 1.0 es por consiguiente más realista. Se recomienda el uso de un factor de carga de 0.85.

En el nivel de servicio F, el congestionamiento es total. La formación de colas después de la intersección, o en la calle transversal, puede restringir el movimiento de vehículos fuera del acceso que se está considerando; de ahí, que no puedan predecirse los volúmenes que puede alojar la intersección. En este caso no puede establecerse un valor para el factor de carga.

En la tabla 6-U se sintetiza el criterio de niveles de servicio descrito anteriormente:

NIVEL DE SERVICIO	CARACTERÍSTICAS DE LA CIRCULACION	FACTOR DE CARGA
A	Libre	0 0
B	Estable	0 1
C	Estable.	0 3
D	Poco estable.	0 7
E (capacidad)	Inestable	1 0
F	Forzada	No aplicable

TABLA 6-U. NIVELES DE SERVICIO Y FACTORES DE CARGA PARA INTERSECCIONES A NIVEL, AISLADAS, CONTROLADAS CON SEMAFORO

6.11.3 Procedimientos para estimar la capacidad, los volúmenes de servicio y los niveles de servicio en intersecciones urbanas

A) Cuando no existen carriles ni fases del semáforo especiales para dar vuelta. Las Figuras 6.54 a 6.58, así como las tablas que están incluidas en ellas, permiten la determinación de la capacidad y de los volúmenes de servicio por hora de luz verde, en calles de uno y de dos sentidos, con o sin estacionamiento, cuando se tienen como datos el ancho del acceso, el factor de carga, el factor de la hora de máxima demanda, la población del área metropolitana y la ubicación dentro de la ciudad.

Las gráficas fueron elaboradas suponiendo las siguientes condiciones medias:

Del lugar: factor de la hora de máxima demanda 0.85; población del área metropolitana 250 000 habitantes y ubicación en la zona comercial del centro.

Del tránsito: 10% de vueltas a la derecha, 10% de vueltas a la izquierda, 5% de vehículos pesados (camiones y autobuses foráneos) y ningún autobús urbano.

Para obtener resultados que reflejen las condiciones de operación de la intersección en estudio, los valores obtenidos de las gráficas deberán afectarse, multiplicándolos por los factores de ajuste correspondientes.

Es importante señalar que, como el volumen obtenido está en vehículos por hora de luz verde, su uso no es práctico para efectos de análisis de la operación de un acceso. Este valor deberá multiplicarse siempre por la relación G/C apropiada para el acceso que se esté considerando, con el fin de determinar la capacidad o volumen de servicio, por hora efectiva.

De acuerdo con lo anterior, la capacidad o el volumen de servicio en cualquier acceso de una intersección controlada con semáforo, puede obtenerse con la siguiente expresión:

$$VS = (VA_{w,FC}) (G/C) (PAM, FHMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B)$$

en la cual:

- VS = Volumen de servicio en el acceso (tránsito mixto en vph).
- $VA_{w,FC}$ = Volumen por hora de luz verde en el acceso, en función del ancho w y del factor de carga FC , obtenido de las Figuras 6.54 a 6.58.
- (G/C) = Relación luz verde-ciclo.
- $(PAM, FHMD)$ = Factor de ajuste combinado, por población del área metropolitana (PAM) y por factor de la hora de máxima demanda ($FHMD$), obtenido de las tablas incluidas en las Figuras 6.54 a 6.58.
- UC = Factor de ajuste por la ubicación dentro de la ciudad, obtenido de las tablas incluidas en las Figuras 6.54 a 6.58.
- VD = Factor de ajuste por porcentaje de vueltas derechas, obtenido de la tabla 6-V.
- VI = Factor de ajuste por porcentaje de vueltas izquierdas, obtenido de la tabla 6-V o 6-W, según el caso.
- T = Factor de ajuste por vehículos pesados (camiones y autobuses foráneos), obtenido de la tabla 6-X.
- B = Factor de ajuste por autobuses urbanos, obtenido de las Figuras 6.59, 6.60, 6.61 o 6.62, según el caso.

El nivel de servicio se obtiene despejando de la misma expresión el volumen por hora de luz en el acceso ($VA_{w,FC}$); con este volumen y con el ancho del acceso considerado, se entra a la gráfica apropiada de las Figuras 6.54 a 6.58; la intersección de estos dos valores permitirá conocer el factor de carga y , por consiguiente, el nivel de servicio buscado (tabla 6-U).

Es importante señalar que, en este caso, VS es el volumen de demanda en vph en el acceso considerado.

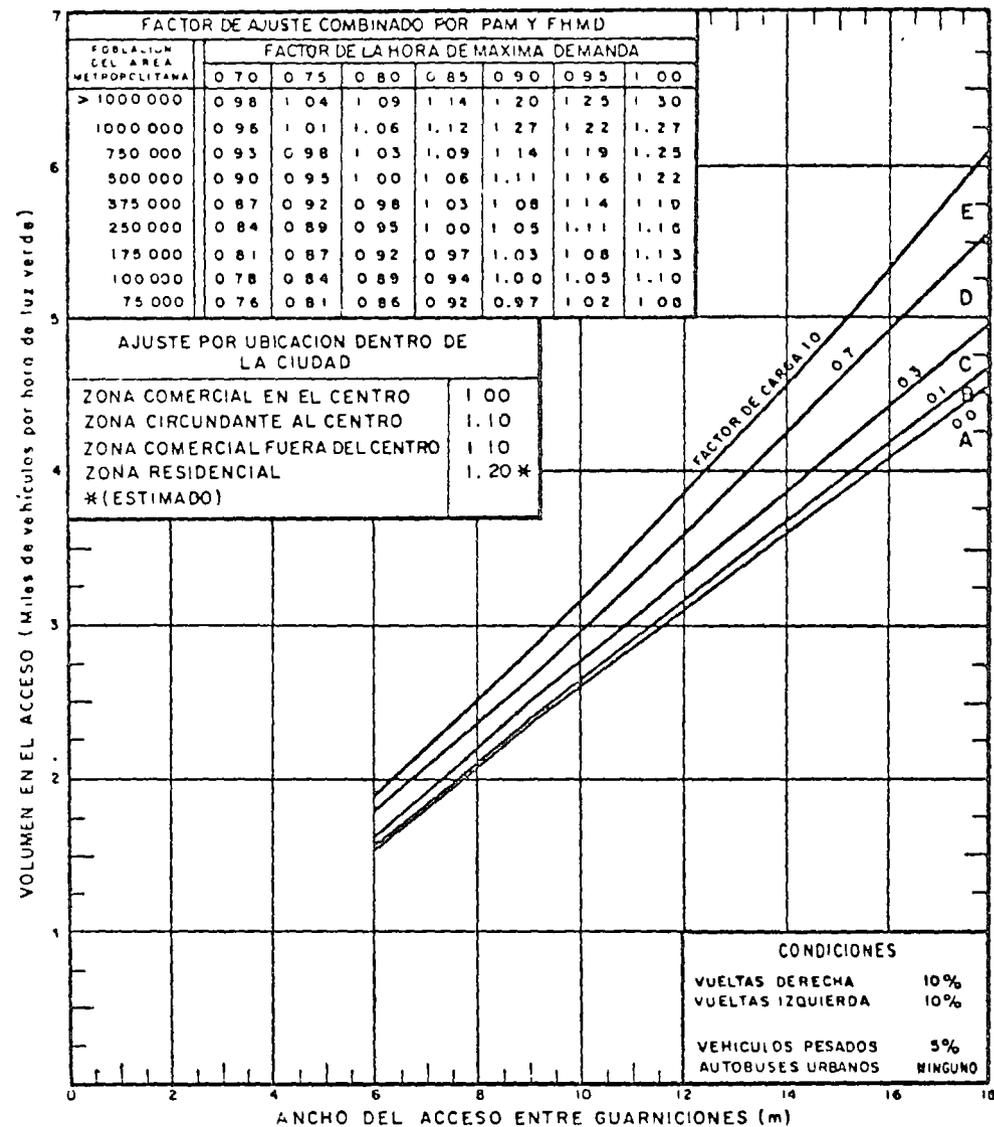


FIGURA 6.54. VOLUMEN DE SERVICIO PARA EL ACCESO A UNA INTERSECCION URBANA EN VEHICULOS POR HORA DE LUZ VERDE, PARA CALLES DE UN SENTIDO DE CIRCULACION SIN ESTACIONAMIENTO

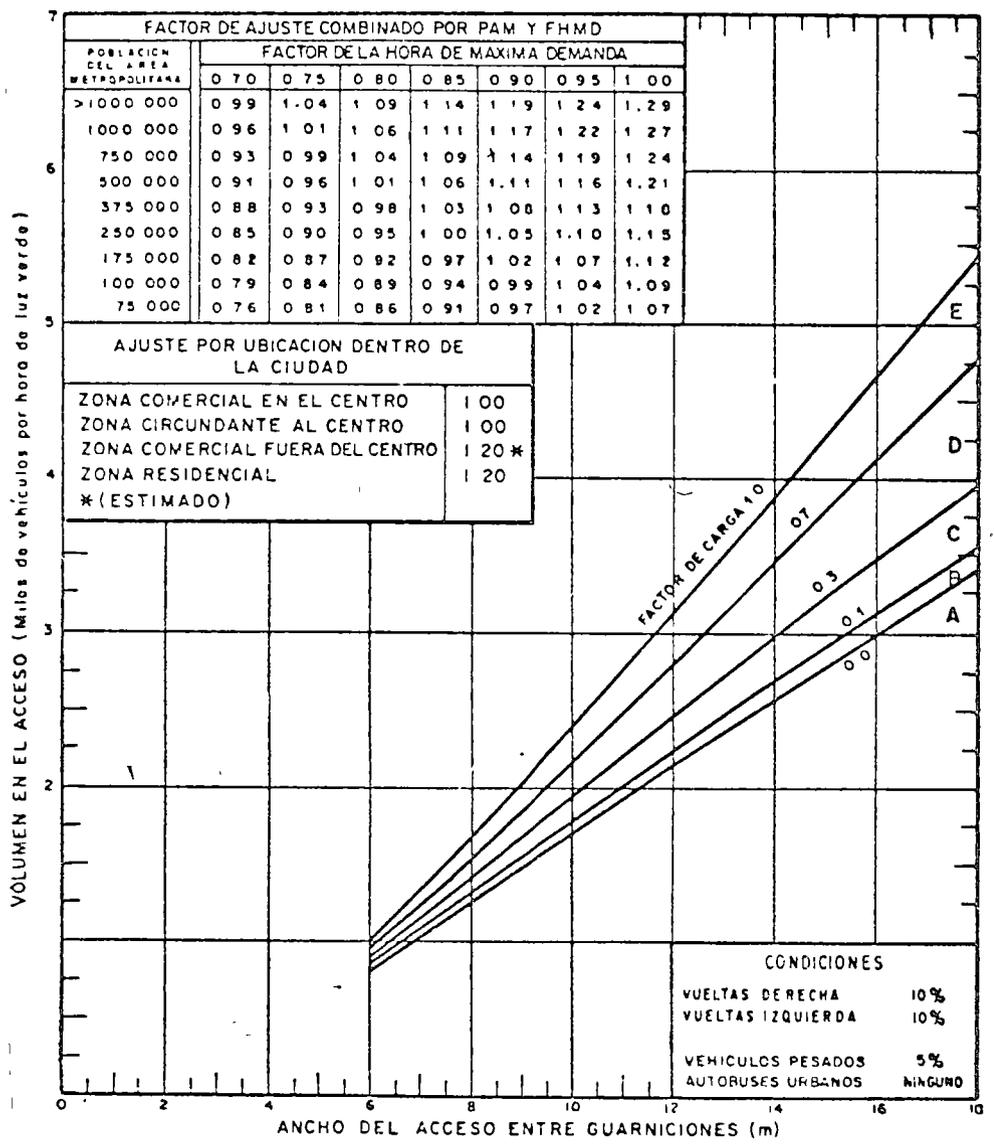


FIGURA 6.55. VOLUMEN DE SERVICIO PARA EL ACCESO A UNA INTERSECCION URBANA, EN VEHICULOS POR HORA DE LUZ VERDE, PARA CALLES DE UN SENTIDO DE CIRCULACION CON ESTACIONAMIENTO EN UN LADO

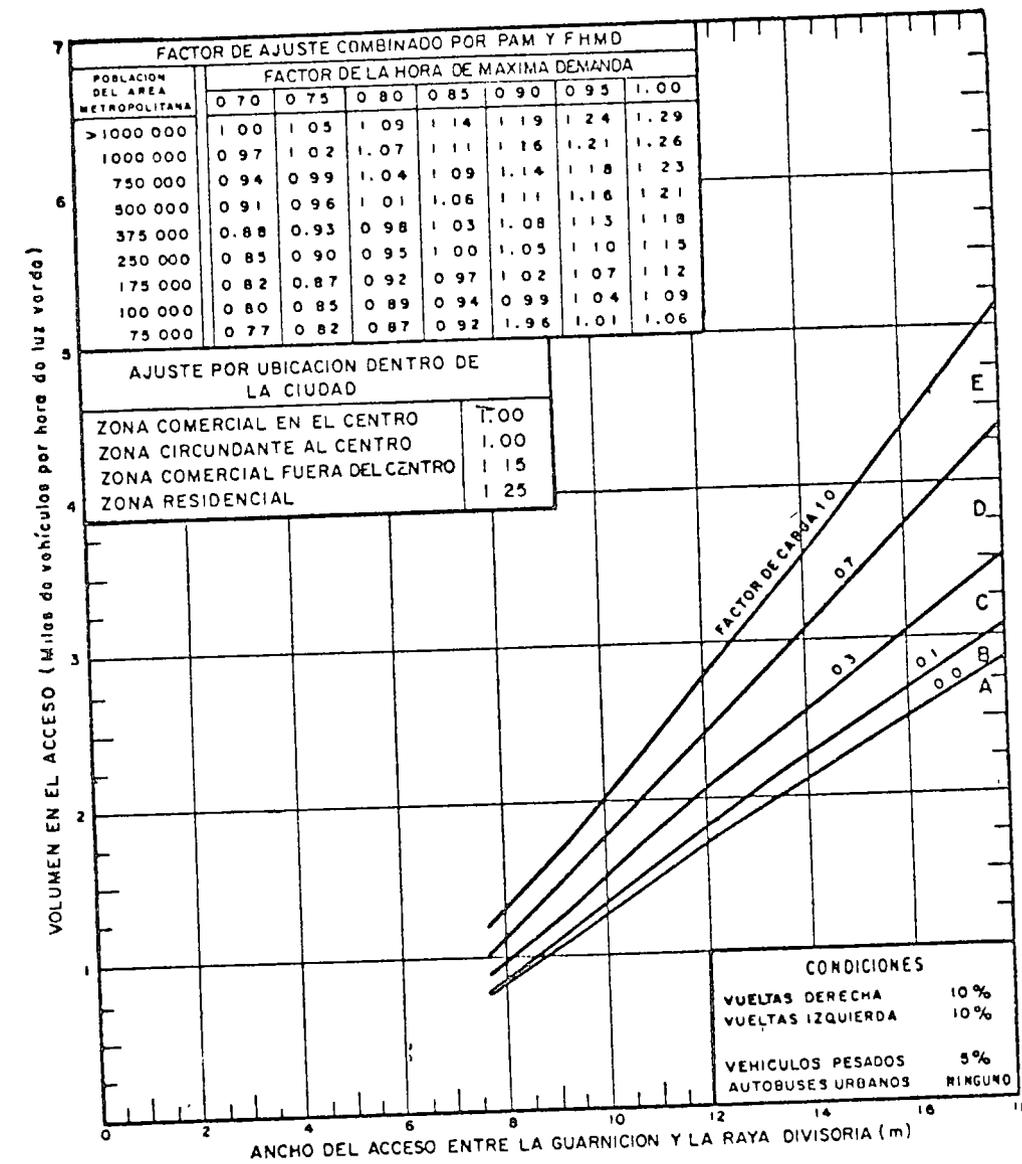


FIGURA 6.56. VOLUMEN DE SERVICIO PARA EL ACCESO A UNA INTERSECCION URBANA, EN VEHICULOS POR HORA DE LUZ VERDE, PARA CALLES DE UN SENTIDO DE CIRCULACION CON ESTACIONAMIENTO EN AMBOS LADOS

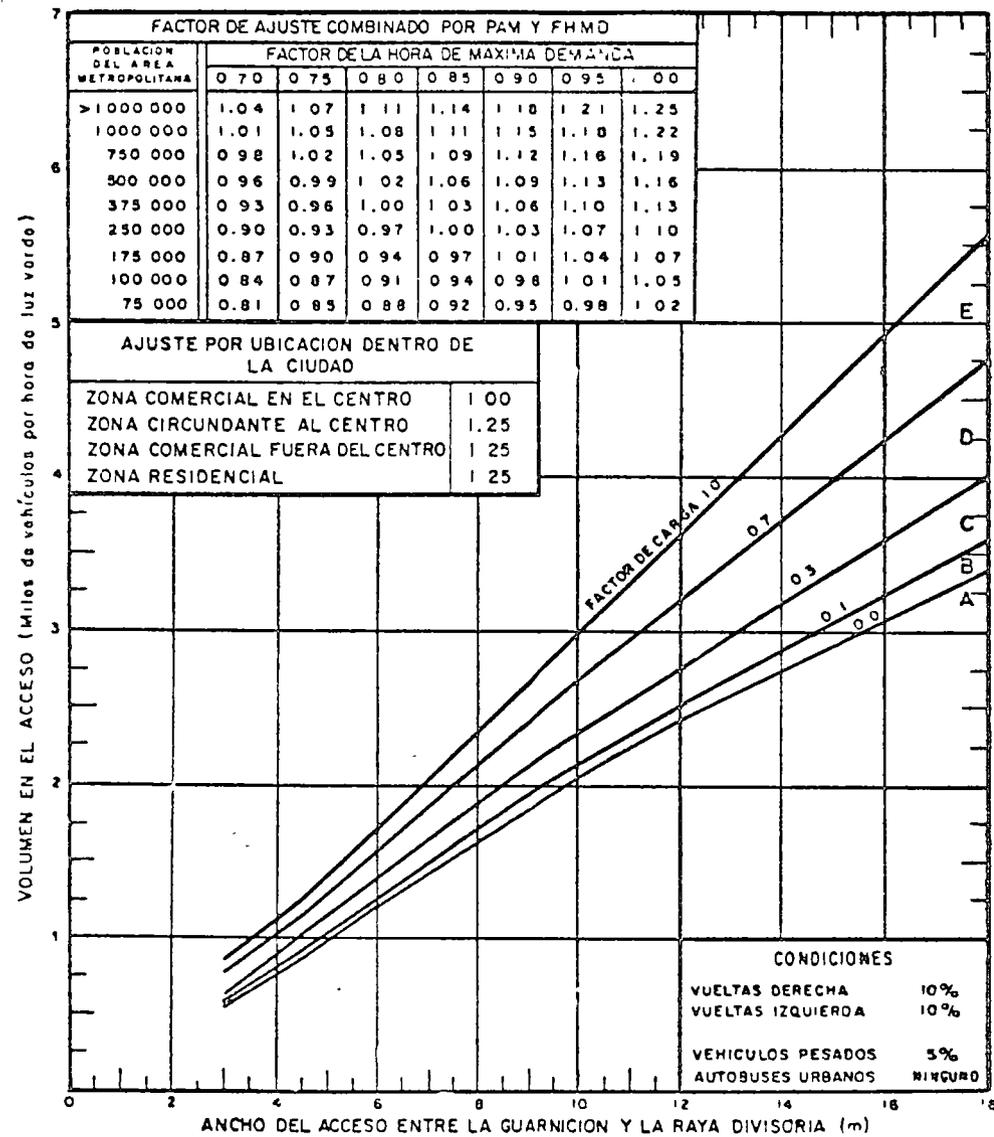


FIGURA 6.57. VOLUMEN DE SERVICIO PARA EL ACCESO A UNA INTERSECCION URBANA, EN VEHICULOS POR HORA DE LUZ VERDE, PARA CALLES DE DOS SENTIDOS DE CIRCULACION SIN ESTACIONAMIENTO

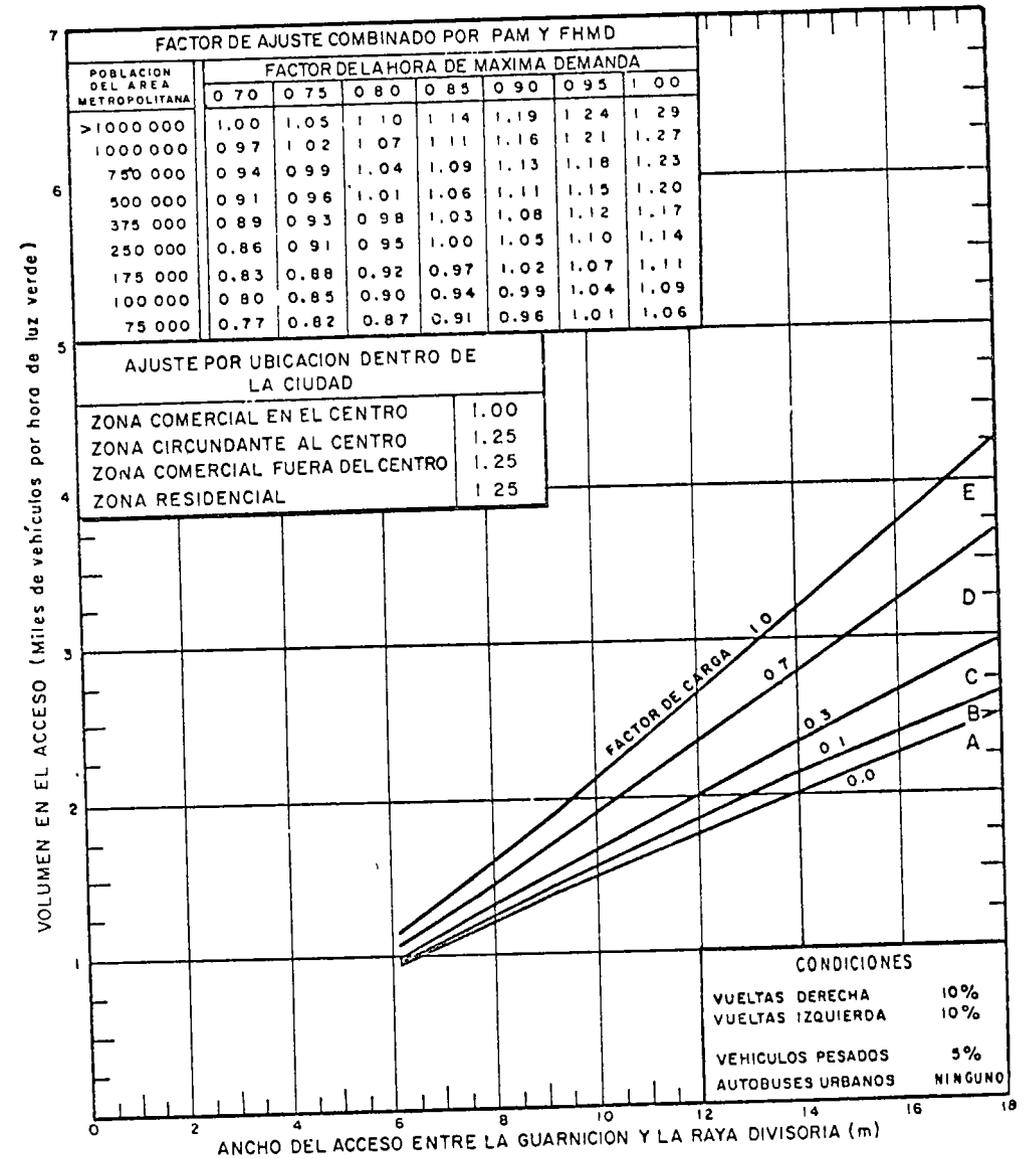


FIGURA 6.58. VOLUMEN DE SERVICIO PARA EL ACCESO A UNA INTERSECCION URBANA, EN VEHICULOS POR HORA DE LUZ VERDE, PARA CALLES DE DOS SENTIDOS DE CIRCULACION CON ESTACIONAMIENTO

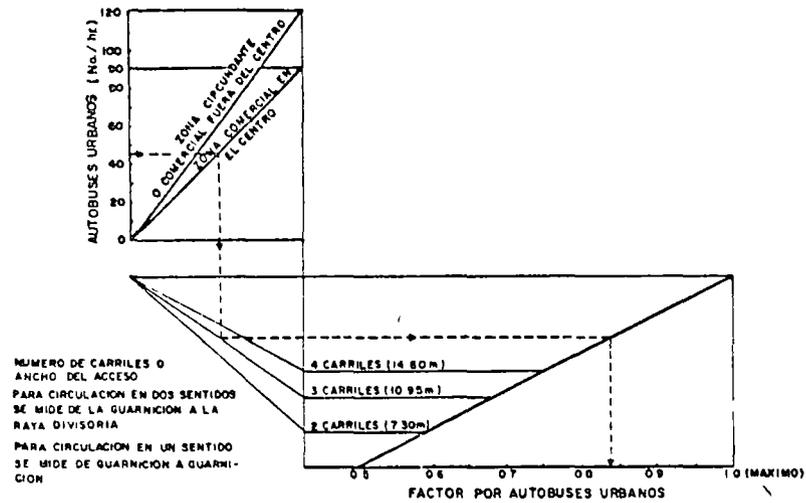


FIGURA 6.59. FACTORES DE AJUSTE POR AUTOBUSES URBANOS CON PARADA ANTES DE CRUZAR LA CALLE Y SIN ESTACIONAMIENTO

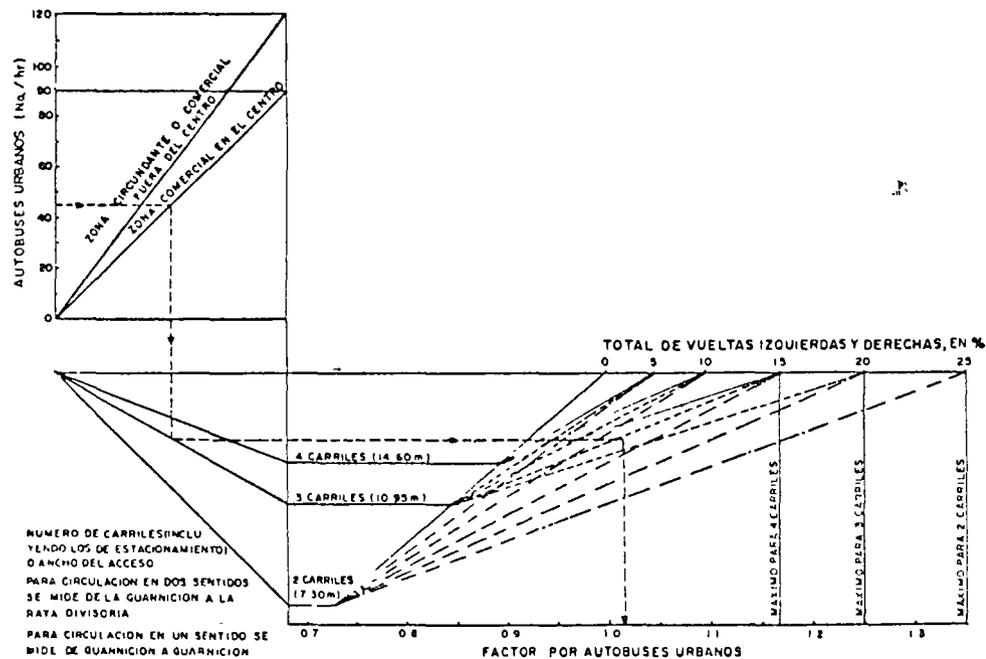


FIGURA 6.60. FACTORES DE AJUSTE POR AUTOBUSES URBANOS CON PARADA ANTES DE CRUZAR LA CALLE Y CON ESTACIONAMIENTO

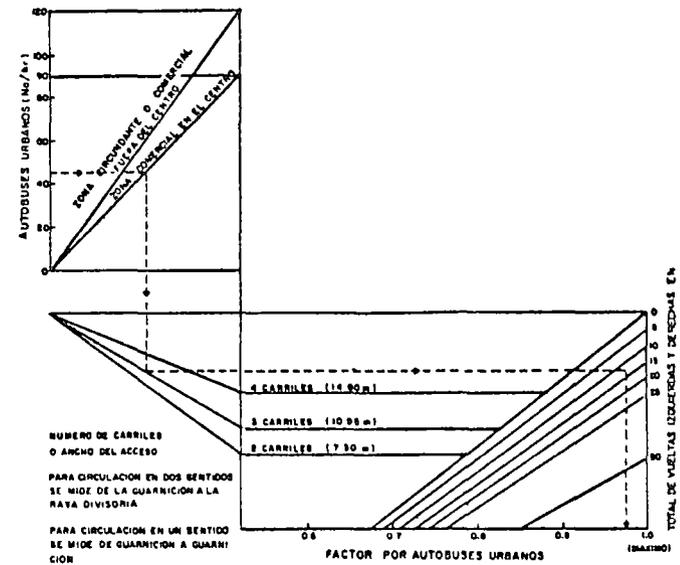


FIGURA 6.61. FACTORES DE AJUSTE POR AUTOBUSES URBANOS CON PARADA DESPUES DE CRUZAR LA CALLE Y SIN ESTACIONAMIENTO

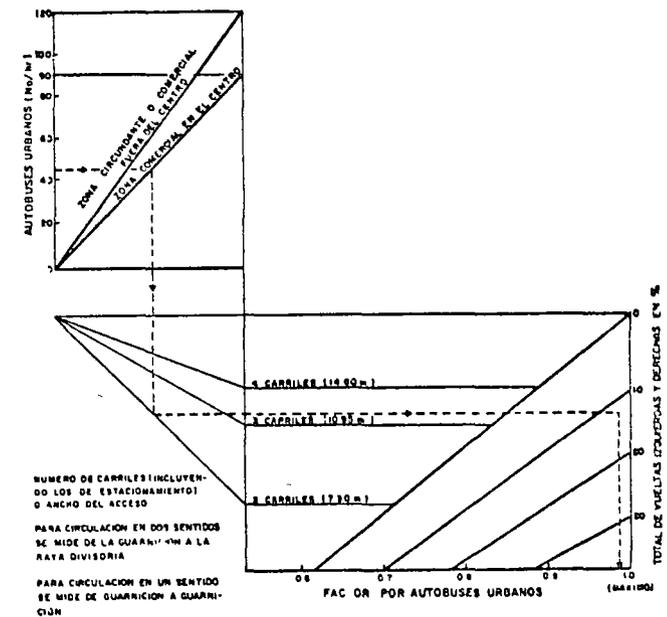


FIGURA 6.62. FACTORES DE AJUSTE POR AUTOBUSES URBANOS CON PARADA DESPUES DE CRUZAR LA CALLE Y CON ESTACIONAMIENTO

VUELTAS ^b %	FACTOR DE AJUSTE ^a					
	SIN ESTACIONAMIENTO ^c			CON ESTACIONAMIENTO ^d		
	ANCHO DEL ACCESO ≤ 4.50m	ANCHO DEL ACCESO 500 a 750m	ANCHO DEL ACCESO 800 a 1050m	ANCHO DEL ACCESO ≤ 6.00 m	ANCHO DEL ACCESO 650 a 9.00m	ANCHO DEL ACCESO 9.50 a 12.00m
0	1.20	1.050	1.025	1.20	1.050	1.025
1	1.18	1.045	1.020	1.18	1.045	1.020
2	1.16	1.040	1.020	1.16	1.040	1.020
3	1.14	1.035	1.015	1.14	1.035	1.015
4	1.12	1.030	1.015	1.12	1.030	1.015
5	1.10	1.025	1.010	1.10	1.025	1.010
6	1.08	1.020	1.010	1.08	1.020	1.010
7	1.06	1.015	1.005	1.06	1.015	1.005
8	1.04	1.010	1.005	1.04	1.010	1.005
9	1.02	1.005	1.000	1.02	1.005	1.000
10	1.00	1.000	1.000	1.00	1.000	1.000
11	0.99	0.995	1.000	0.99	0.995	1.000
12	0.98	0.990	0.995	0.98	0.990	0.995
13	0.97	0.985	0.995	0.97	0.985	0.995
14	0.96	0.980	0.990	0.96	0.980	0.990
15	0.95	0.975	0.990	0.95	0.975	0.990
16	0.94	0.970	0.985	0.94	0.970	0.985
17	0.93	0.965	0.985	0.93	0.965	0.985
18	0.92	0.960	0.980	0.92	0.960	0.980
19	0.91	0.955	0.980	0.91	0.955	0.980
20	0.90	0.950	0.975	0.90	0.950	0.975
22	0.89	0.940	0.980	0.89	0.940	0.980
24	0.88	0.930	0.985	0.88	0.930	0.985
26	0.87	0.920	0.990	0.87	0.920	0.990
28	0.86	0.910	0.995	0.86	0.910	0.995
30 ó más	0.85	0.900	1.000	0.85	0.900	1.000

- a) Sin carriles especiales para vueltas o indicaciones especiales del semáforo.
b) Considérense las vueltas a la derecha y a la izquierda separadamente. No se sumen.
c) No es necesario el ajuste para anchos del acceso mayores de 10.50 m.
d) No es necesario el ajuste para anchos del acceso mayores de 12.00 m.

TABLA 6-V. FACTORES DE AJUSTE POR VUELTAS A LA DERECHA EN CALLES DE DOS SENTIDOS, VUELTAS A LA DERECHA EN CALLES DE UN SENTIDO Y VUELTAS A LA IZQUIERDA EN CALLES DE UN SENTIDO

VUELTAS %	FACTOR DE AJUSTE ^a					
	SIN ESTACIONAMIENTO			CON ESTACIONAMIENTO		
	ANCHO DEL ACCESO ≤ 4.50m	ANCHO DEL ACCESO 500 a 1050m	ANCHO DEL ACCESO ≥ 11.00m	ANCHO DEL ACCESO ≤ 6.00m	ANCHO DEL ACCESO 650 a 12.00m	ANCHO DEL ACCESO ≥ 12.50m
0	1.30	1.10	1.050	1.30	1.10	1.050
1	1.27	1.09	1.045	1.27	1.09	1.045
2	1.24	1.08	1.040	1.24	1.08	1.040
3	1.21	1.07	1.035	1.21	1.07	1.035
4	1.18	1.06	1.030	1.18	1.06	1.030
5	1.15	1.05	1.025	1.15	1.05	1.025
6	1.12	1.04	1.020	1.12	1.04	1.020
7	1.09	1.03	1.015	1.09	1.03	1.015
8	1.06	1.02	1.010	1.06	1.02	1.010
9	1.03	1.01	1.005	1.03	1.01	1.005
10	1.00	1.00	1.000	1.00	1.00	1.000
11	0.98	0.99	0.995	0.98	0.99	0.995
12	0.96	0.98	0.990	0.96	0.98	0.990
13	0.94	0.97	0.985	0.94	0.97	0.985
14	0.92	0.96	0.980	0.92	0.96	0.980
15	0.90	0.95	0.975	0.90	0.95	0.975
16	0.89	0.94	0.970	0.89	0.94	0.970
17	0.88	0.93	0.965	0.88	0.93	0.965
18	0.87	0.92	0.960	0.87	0.92	0.960
19	0.86	0.91	0.955	0.86	0.91	0.955
20	0.85	0.90	0.950	0.85	0.90	0.950
22	0.84	0.89	0.940	0.84	0.89	0.940
24	0.83	0.88	0.930	0.83	0.88	0.930
26	0.82	0.87	0.920	0.82	0.87	0.920
28	0.81	0.86	0.910	0.81	0.86	0.910
30 ó más	0.80	0.85	0.900	0.80	0.85	0.900

- a) Sin carriles especiales para vueltas o indicaciones especiales del semáforo.

TABLA 6-W. FACTORES DE AJUSTE POR VUELTAS A LA IZQUIERDA EN CALLES DE DOS SENTIDOS

CAMIONES Y AUTOBUSES FORANEOS %	FACTOR DE AJUSTE	CAMIONES Y AUTOBUSES FORANEOS %	FACTOR DE AJUSTE	CAMIONES Y AUTOBUSES FORANEOS %	FACTOR DE AJUSTE
0	1.05	7	0.98	14	0.91
1	1.04	8	0.97	15	0.90
2	1.03	9	0.96	16	0.89
3	1.02	10	0.95	17	0.88
4	1.01	11	0.94	18	0.87
5	1.00	12	0.93	19	0.86
6	0.99	13	0.92	20	0.85

TABLA 6-X. FACTORES DE AJUSTE POR CAMIONES Y AUTOBUSES FORANEOS

B) Cuando existen carriles especiales para vueltas controladas con semáforo. El procedimiento a seguir, es el siguiente:

1. Dedúzcase del ancho del acceso el ancho del carril o carriles especiales para dar vuelta. Calcúlese el volumen de servicio correspondiente al ancho que resulte, siguiendo el mismo procedimiento indicado en el apartado A), pero considerando 0% de vueltas.

2. Considérese que un carril especial para dar vuelta tiene los siguientes volúmenes de servicio:

Nivel de servicio	Vehículos por hora de luz verde (un carril)	Vehículos pesados (%)
A, B, C,	800	5
D	1 000	5
E (capacidad)	1 200	5

Aplíquese la relación G/C correspondiente a la indicación de luz verde para vueltas y el factor de ajuste apropiado obtenido de la tabla 6-X para porcentajes de vehículos pesados diferentes del 5%.

Cuando existen dos o más carriles especiales para dar vuelta, al primer carril se le asignan los valores de la tabla y a los demás se les asigna el 80% del valor del primer carril.

3. Súmense los volúmenes de servicio calculados de acuerdo con lo indicado en los puntos 1 y 2, para obtener el volumen de servicio total para el acceso.

C) Cuando existen carriles especiales para vueltas que no estén controladas por el semáforo. El procedimiento a seguir es el siguiente:

1. Dedúzcase del ancho del acceso, el ancho del carril o carriles especiales para dar vuelta. Calcúlese el volumen de servicio correspondiente al ancho que resulte, siguiendo el mismo procedimiento indicado en el apartado A), pero considerando 0% de vueltas.

2. En este caso se presentan dos variantes:

a) Con un carril especial para vueltas a la derecha: para cualquier nivel de servicio, úsese un valor igual a $600 \times G/C$ en vehículos por hora, suponiendo 5% de vehículos pesados en caso de que las vueltas deban efectuarse simultáneamente con el cruce de peatones. Si no existe cruce con peatones, úsese los valores que se dan para la condición en que exista control del semáforo, ver apartado B). Hágase el ajuste por vehículos pesados, aplicando los factores de la tabla 6-X.

b) Con un carril especial para vueltas a la izquierda: para cualquier nivel de servicio, considérese el volumen de servicio como la diferencia entre 1 200 vehículos y el volumen total de tránsito en sentido contrario, en términos de vehículos ligeros por hora de luz verde, pero no menos de dos vehículos por cada ciclo del semáforo; aplíquese la relación G/C según sea el caso, y hágase el ajuste por vehículos pesados, aplicando los factores de la tabla 6-X.

3. Súmense los volúmenes de servicio calculados de acuerdo con lo indicado en los puntos 1, 2 a) y 2 b), para obtener el volumen de servicio total para el acceso.

D) Cuando no existan carriles especiales para vueltas pero existe control del semáforo. Esta situación se presenta cuando se permiten movimientos de vuelta en intervalos diferentes al de la fase del semáforo para el tránsito que sigue de frente, por medio de flechas dentro de la indicación de luz verde, aun cuando no existan carriles especiales para dar vuelta. Esto ocurre también, cuando el tránsito en dirección opuesta no tiene periodos simultáneos de luz verde.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

1. Cuando exista tránsito en sentido contrario, aplíquese el procedimiento indicado en el apartado A) para el cálculo de volúmenes de servicio, considerando el ancho del acceso.

2. Cuando no exista tránsito en sentido contrario, aplíquese también el procedimiento indicado en el apartado A) para el cálculo de volúmenes de servicio, considerando las vueltas a la izquierda como vueltas en calles de un solo sentido.

3. Súmense los volúmenes de servicio calculados de acuerdo con lo indicado en los puntos 1 y 2, para obtener el volumen de servicio total en el acceso.

6.11.4 Procedimientos para estimar la capacidad, los volúmenes de servicio y los niveles de servicio en intersecciones rurales

Para intersecciones en zonas rurales, se toma como base para el cálculo la Figura 6.63, la cual permite la determinación de la capacidad y de los volúmenes de servicio en este tipo de intersecciones. Esta gráfica ha sido elaborada suponiendo un valor de 0.7 para el factor de la hora de máxima demanda y sin estacionamiento en el camino. Además, se supusieron las siguientes condiciones del tránsito: 10% de vueltas a la derecha, 10% de vueltas a la izquierda y 5% de vehículos pesados. Para condiciones distintas de las mencionadas, los resultados que se obtengan de la gráfica, deberán afectarse por los factores de ajuste correspondientes.

Si la intersección rural está sobre un camino exento de conflictos urbanos, pero sujeta ocasionalmente a fuerte demanda por un lapso de varias horas, o sea con un factor de la hora de máxima demanda igual a 1.00 que genere una acumulación continua de vehículos, la operación puede aproximarse al valor máximo de 1 500 vehículos ligeros por carril por hora de luz verde. Bajo estas condiciones, los volúmenes que se lean en la gráfica, para factores de carga cercanos a 1.0, deben multiplicarse por 1.4.

Cuando exista estacionamiento, puede emplearse la Figura 6.58 en lugar de la Figura 6.53, pero sin aplicar los factores de las tablas que aparecen en esa figura.

La capacidad o el volumen de servicio en cualquier acceso de una intersección rural se obtiene con la siguiente expresión:

$$VS = (VA_{w,FC}) (G/C) (VD) (VI) (T)$$

en la cual:

- VS = Volumen de servicio en el acceso (tránsito mixto en vph).
- $VA_{w,FC}$ = Volumen por hora de luz verde en el acceso, en función del ancho w y del factor de carga FC obtenido de la Figura 6.63. Cuando exista estacionamiento úsese la Figura 6.58, pero sin aplicar los factores de ajuste de las tablas que aparecen en esa figura.
- G/C = Relación luz verde-ciclo.
- VD = Factor de ajuste por porcentaje de vueltas derechas, obtenido de la tabla 6-V.
- VI = Factor de ajuste por porcentaje de vueltas izquierdas, obtenido de la tabla 6-V o de la tabla 6-W, según el caso.
- T = Factor de ajuste por vehículos pesados, obtenido de la tabla 6-X.

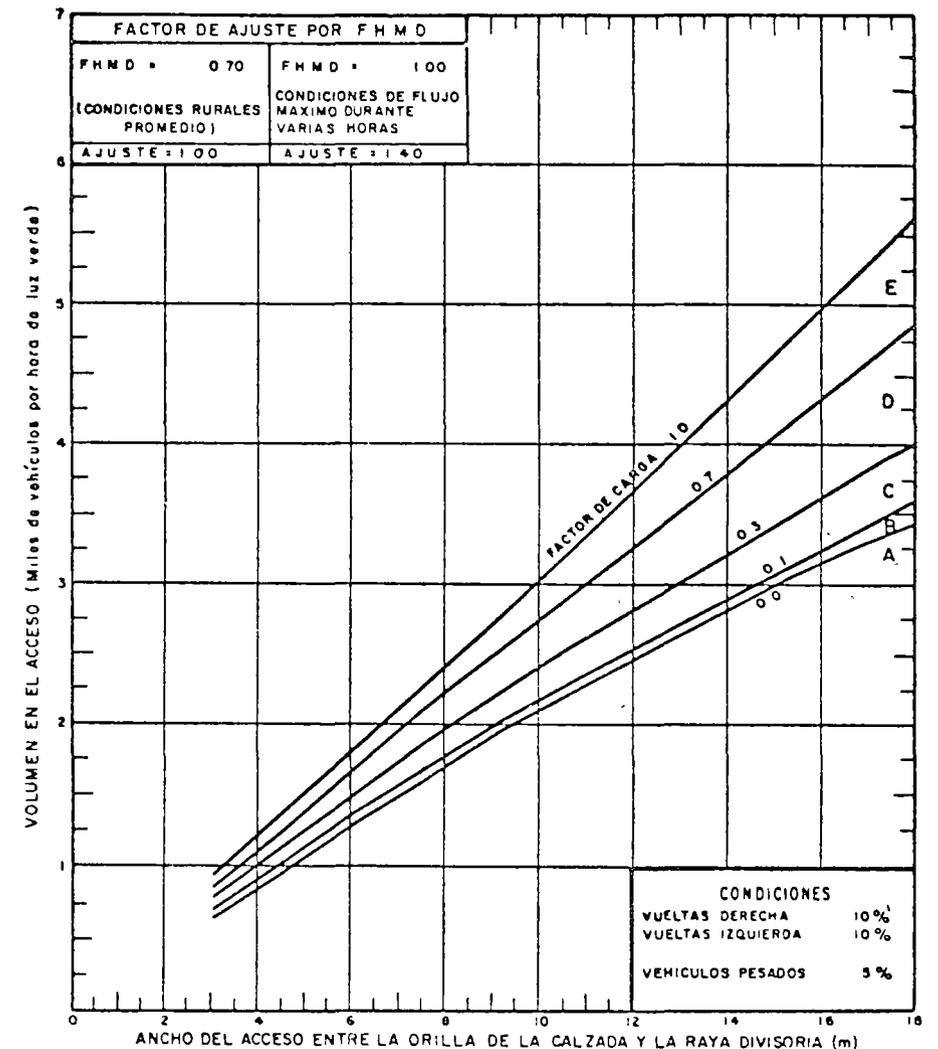


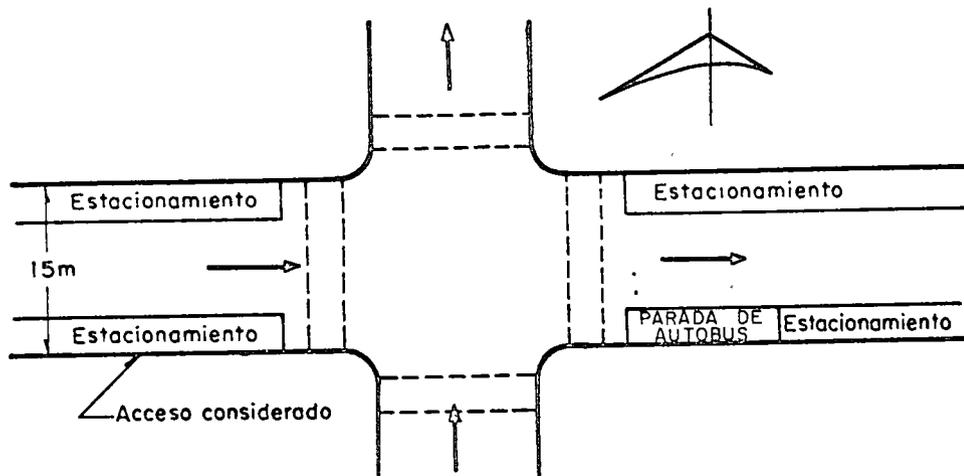
FIGURA 6.63. VOLUMEN DE SERVICIO PARA EL ACCESO A UNA INTERSECCION RURAL, EN VEHICULOS POR HORA DE LUZ VERDE PARA CAMINOS DE DOS SENTIDOS DE CIRCULACION SIN ESTACIONAMIENTO

6.11.5 Solución de ejemplos típicos

Ejemplo 1.

A. Datos:

Intersección de 2 calles, ambas de un solo sentido de circulación.
 Ancho del acceso en estudio = 15 m, véase croquis que se incluye.
 Estacionamiento en ambos lados.
 Ubicación en la zona circundante al centro de la ciudad.
 Población del área metropolitana = 175 000 habitantes.
 Factor de la hora de máxima demanda = 0.75.
 Fases cargadas = 10/hora.
 Longitud del ciclo = 60 segundos.
 Intervalo de luz verde = 30 segundos.
 Vueltas a la derecha = cero.
 Vueltas a la izquierda = 8%.
 No existe carril ni fase especial para vuelta.
 Vehículos pesados = 7%.
 Autobuses urbanos = 10/hora, con parada después de cruzar la calle.



B. Determínese:

Para el acceso en estudio:

1. El volumen de servicio.
2. El nivel de servicio.
3. La capacidad.

C. Solución:

1. Volumen de servicio:

$$VS = (VA_{w,FC}) (G/C) (PAM, FHMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B)$$

Para determinar el valor de $VA_{w,FC}$, es necesario primero determinar al factor de carga, el cual está en función del número de fases cargadas dentro de la hora $FC = 10/60 = 0.166$

$$VA_{w,FC} = 2\ 600 \text{ vph de luz verde (de la Figura 6.56).}$$

$$G/C = 30/60 = 0.50$$

$$PAM, FHMD = 0.87 \text{ (de la tabla de la Figura 6.56)}$$

$$UC = 1.00 \text{ (de la tabla de la Figura 6.56)}$$

$$VD = 1.00 \text{ (de la tabla 6-V)}$$

$$T = 0.98 \text{ (de la tabla 6-X)}$$

$$B = 1.00 \text{ (de la Figura 6.62)}$$

Substituyendo:

$$VS = 2\ 600 \times 0.50 \times 0.87 \times 1.00 \times 1.00 \times 1.00 \times 0.98 \times 1.00$$

$$VS = 1\ 108 \text{ vph}$$

2. Nivel de servicio.

De la tabla 6-U para un factor de carga de 0.166, el nivel de servicio correspondiente es C.

3. Capacidad.

En este caso, a falta de información relativa al factor de carga bajo condiciones de altos volúmenes de tránsito, supóngase un factor de carga = 0.85.

Con excepción del valor de $VA_{w,FC}$ el cual varía con el nuevo factor de carga, los demás factores permanecen invariables.

$$VA_{w,FC} = 3\ 700 \text{ vph de luz verde (de la Figura 6.56)}$$

$$C = 3\ 700 \times 0.50 \times 0.87 \times 1.00 \times 1.00 \times 1.00 \times 0.98 \times 1.00$$

$$C = 1\ 577 \text{ vph}$$

Ejemplo 2.

A. Datos:

Intersección de 2 calles, ambas de 2 sentidos de circulación. El acceso por analizar es el correspondiente a la rama poniente de la intersección y se plantean las siguientes condiciones:

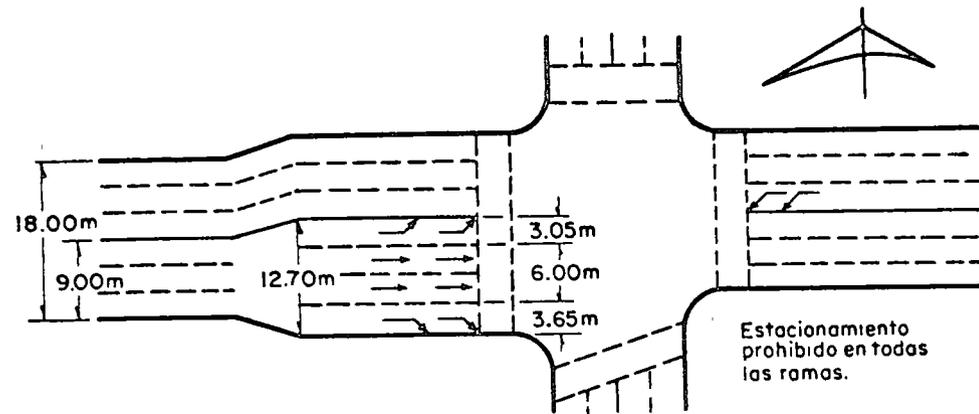
a) El acceso es ampliado para proporcionar 4 carriles de circulación, reservándose un carril para vueltas a la izquierda y un carril para vueltas a la derecha. Los anchos se muestran en el croquis que se incluye.

b) El acceso no es ampliado, conservándose únicamente 9 m de ancho. Sin estacionamiento.

Zona comercial fuera del centro de la ciudad.

Población del área metropolitana = 375 000 habitantes.

Factor de la hora de máxima demanda = 0.85



Operación del semáforo:

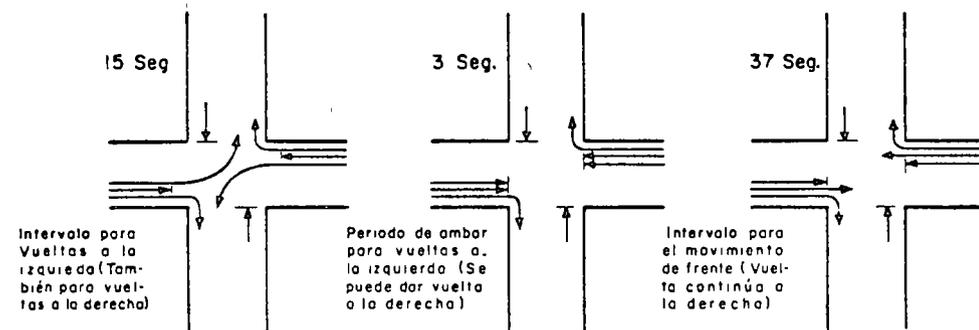
Para la condición a):

Longitud del ciclo = 90 seg.

Intervalo de luz verde para el tránsito que sigue de frente = 37 seg.

Intervalo de luz verde para vueltas a la izquierda = 15 seg. (simultáneo con las vueltas a la izquierda del sentido opuesto, pero separado de la indicación del semáforo para el tránsito de frente).

Intervalo de luz verde para vueltas a la derecha = 55 seg. (simultáneo con la luz verde para vueltas a la izquierda, luz ámbar para vueltas a la izquierda y luz verde para el tránsito de frente) = 15 + 3 + 37 = 55 seg.



Para la condición b):

Longitud del ciclo = 90 seg.

Intervalo de luz verde, para todos los movimientos = 55 seg.

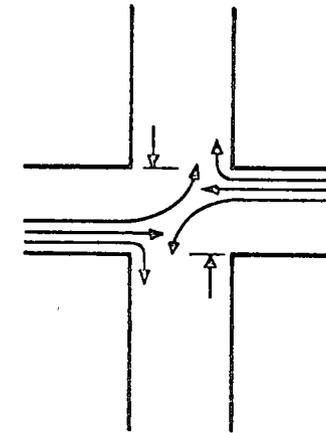
Vueltas a la derecha = 28%.

Vueltas a la izquierda = 10%.

Vehículos pesados = 3%.

Autobuses urbanos = ninguno.

Sin interferencia de peatones.



B. Determinese:

Volumen que puede alojar el acceso, al nivel de servicio D.

Para las condiciones a) y b) planteadas en los datos.

C. Solución:

1. Para la condición a):

En este caso, es aplicable el criterio señalado en el apartado B) del inciso 6.11.3.

Volumen de servicio en los carriles disponibles para el tránsito que sigue de frente:

$$VS_D = (VA_{w, FC} (G/C) (PAM, FHMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B))$$

w = 6.0 m (ancho disponible para el tránsito que sigue de frente)

FC = 0.7 (de la tabla 6-U, para nivel de servicio D)

VA_{w, FC} = 1 600 vph de luz verde (de la Figura 6.57)

$$G/C = 37/90 = 0.41$$

PAM, FHMD = 1.03 (de la tabla de la Figura 6.57)

UC = 1.25 (de la tabla de la Figura 6.57)

VD = 1.05 (de la tabla 6-V, para 0% de vueltas derechas)

VI = 1.10 (de la tabla 6-W, para 0% de vueltas izquierdas)

T = 1.02 (de la tabla 6-X)

B = (No aplicable en este ejemplo)

Substituyendo:

$$VS_D = 1\ 600 \times 0.41 \times 1.03 \times 1.25 \times 1.05 \times 1.10 \times 1.02$$

$$VS_D = 995 \text{ vph (de frente)}$$

Volumen de servicio en el carril especial para vueltas a la derecha.

Volumen por hora de luz verde. Para el nivel D, el volumen de servicio correspondiente a un carril especial para dar vuelta, es de 1 000 vph de luz verde, considerando 5% de vehículos pesados y un ancho del carril de 3.05 m. Como en este caso el ancho del carril es de 3.65 m, el volumen de servicio se verá afectado por la relación 3.65/3.05.

$$\text{Relación } G/C = 55/90 = 0.61$$

$$T = 1.02 \text{ (de la tabla 6-X)}$$

Substituyendo:

$$VS_D = 1\,000 \times \frac{3.65}{3.05} \times 0.61 \times 1.02$$

$$VS_D = 748 \text{ vph}$$

Volumen de servicio en el carril especial para vueltas a la izquierda.

Procediendo en forma semejante:

Volumen por hora de luz verde = 1 000 vph

$$\text{Relación } G/C = 15/90 = 0.166$$

$$T = 1.02$$

Substituyendo:

$$VS_D = 1\,000 \times 0.166 \times 1.02$$

$$VS_D = 170 \text{ vph}$$

Verificación de los volúmenes de servicio que proporciona el acceso en los carriles para dar vuelta y la distribución del tránsito que llega al acceso.

Vueltas a la derecha = 28%.

Vueltas a la izquierda = 10%.

Tránsito de frente = 62%

Volumen de servicio posible en todo el acceso al nivel de servicio

$$D = 995/0.62 = 1\,604 \text{ vph.}$$

Posible volumen que puede dar vuelta a la derecha = $1\,604 \times 0.28 = 449$ vph.

Como $449 \text{ vph} < 748 \text{ vph}$, la operación es satisfactoria al nivel D.

Posible volumen que puede dar vuelta a la izquierda = $1\,604 \times 0.10 = 160$ vph.

Como $160 \text{ vph} < 170 \text{ vph}$, la operación es satisfactoria al nivel D.

2. Para la condición b):

En este caso es aplicable el criterio señalado en la parte primera del apartado D) del inciso 6.11.3

$$VS_D = (VA_{w, FC}) (G/C) (PAM, FHMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B)$$

$$w = 9.00 \text{ m (ancho sin considerar la ampliación)}$$

$$FC = 0.7 \text{ (de la tabla 6-U, para nivel de servicio D)}$$

$$VA_{w, FC} = 2\,420 \text{ vph de luz verde (de la Fig. 6.57)}$$

$$G/C = 55/90 = 0.61$$

Los factores de ajuste son los mismos que para la solución a) del ejemplo, excepto que en este caso:

$$VD = 0.995 \text{ (de la tabla 6-V; para 28\% de vueltas derechas)}$$

$$VI = 1.00 \text{ (de la tabla 6-W; para 10\% de vueltas izquierdas)}$$

Substituyendo:

$$VS_D = 2\,420 \times 0.61 \times 1.03 \times 1.25 \times 0.995 \times 1.00 \times 1.02$$

$$VS_D = 1\,930 \text{ vph}$$

Conclusión:

Los resultados indican que para el nivel de servicio D, los volúmenes de servicio son:

Para la condición a): 1 604 vph con ampliación del acceso y proporcionando carriles especiales para vueltas a la derecha y a la izquierda con indicaciones especiales de luz verde del semáforo.

Para la condición b): 1 930 vph sin ampliación y con una sola indicación de luz verde del semáforo.

Lo anterior demuestra claramente que la adición de carriles especiales para vueltas y la operación con fases múltiples del semáforo, no significa que automáticamente se logre un incremento en los volúmenes de servicio.

Las razones que justifican los resultados anteriores, son las siguientes:

1. La utilización de los carriles disponibles es proporcional a la distribución de la demanda: 28% en el carril derecho, 31% en cada uno de los dos carriles centrales y 10% en el carril izquierdo. Esto trae como consecuencia, el uso desbalanceado del ancho del acceso disponible.

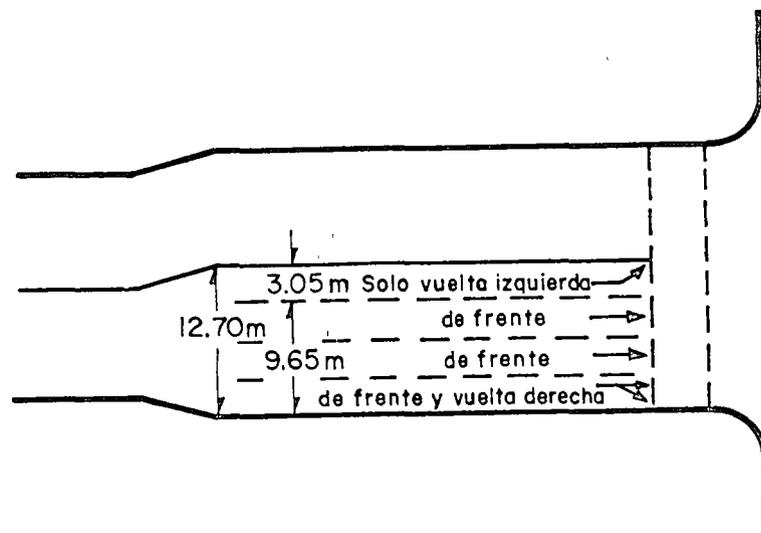
2. Se ha sustraído una parte considerable al tiempo de luz verde del tránsito que sigue de frente, para proporcionar el tiempo necesario para la fase del tránsito que da vuelta a la izquierda; sin embargo, la pérdida de capacidad en los carriles centrales es considerablemente mayor que lo que se gana en el carril para vuelta a la izquierda.

3. El carril para vueltas a la izquierda es usado principalmente para almacenamiento en lugar de utilizarse para desalojar el tránsito.

4. El carril para vueltas a la derecha tiene mucho más capacidad que la requerida para satisfacer la demanda de ese movimiento.

En este caso particular es posible, aparentemente, incrementar el volumen de servicio si el carril especial para vueltas a la derecha es utilizado también por los vehículos que siguen de frente, aun cuando tengan que ser eliminadas las vueltas a la derecha durante la indicación de luz verde para vueltas a la izquierda.

En estas condiciones, la operación sería la siguiente:



Volúmenes de servicio al nivel D.

En el carril especial para vueltas a la izquierda, el volumen de servicio es el mismo que para la parte 1 del ejemplo.

Para el resto de los carriles:

$$VS_D = (VA_{w, FC}) (G/C) (PAM, FHMD) (UC) (VC) (VI) (T) (B)$$

$$w = 9.65 \text{ m}$$

$$FC = 0.7 \text{ (de la tabla 6-U, para nivel de servicio)}$$

$$VA_{w, FC} = 2600 \text{ vph de luz verde (de la Figura 6.57)}$$

$$G/C = 37/90 = 0.41$$

$$PAM, FHMD = 1.03 \text{ (de la tabla de la Figura 6.57)}$$

$$UC = 1.25 \text{ (de la tabla de la Figura 6.57)}$$

$$VD = 0.995 \text{ (de la tabla 6-V; para 28\%)}$$

$$VI = 1.10 \text{ (de la tabla 6-W; para 0\%)}$$

$$T = 1.02 \text{ (de la tabla 6-X)}$$

Substituyendo:

$$VS_D = 2600 \times 0.41 \times 1.03 \times 1.25 \times 0.995 \times 1.10 \times 1.02$$

$$VS_D = 1530 \text{ vph}$$

Volumen de demanda total con base en el porcentaje del tránsito que va de frente y del que da vuelta a la derecha = $1530/0.90 = 1700 \text{ vph}$.

Vueltas potenciales a la izquierda, suponiendo que el tránsito de frente y el tránsito a la derecha son los que controlan, $1700 \times 0.10 = 170 \text{ vph}$.

Comparando con el volumen de servicio, $170 = 170$; por lo anterior la operación es satisfactoria, aunque en el límite. Se deduce, por lo tanto, que el acceso podría alojar un volumen de demanda de $1530 + 170 = 1700 \text{ vph}$.

6.12 ANALISIS DE CAPACIDAD Y VOLUMENES DE SERVICIO EN ARTERIAS URBANAS Y SUBURBANAS

Para propósitos de análisis, las arterias urbanas y suburbanas se consideran como avenidas localizadas fuera de la zona comercial del centro de la ciudad, las cuales se caracterizan bien sea por la existencia de intersecciones controladas con semáforo a una distancia promedio de 1500 m o menos, o bien, porque las velocidades límites son de 60 km/h o menores, como consecuencia del desarrollo urbano adyacente.

La capacidad de las arterias urbanas depende principalmente de la capacidad de las intersecciones a nivel que se encuentran a lo largo de la arteria, analizadas en forma aislada. Sin embargo, cuando se desea conocer el nivel de servicio que puede suministrar la arteria, es necesario hacer el análisis considerándola en toda su longitud.

6.12.1 Nivel de servicio

Primeramente debe investigarse el efecto que tienen las interrupciones y las intersecciones sobre la operación del tránsito, debiendo analizarse después la arteria en toda su longitud, para determinar un valor promedio de la relación volumen-capacidad (relación v/c). Esto permitirá conocer la naturaleza verdadera de las condiciones operacionales que encuentran los conductores.

La velocidad usada en el análisis es la velocidad global, debido a que la velocidad de operación es difícil de definir donde existe una variedad de interrupciones.

Las velocidades globales están en función de factores tales como: límites de velocidad, número de intersecciones y conflictos a la mitad de la cuadra y en las intersecciones; el efecto de estas interrupciones es mayor a medida que aumentan los volúmenes de tránsito. La calidad del alineamiento, por otra parte, tiene un efecto relativamente pequeño sobre la velocidad, excepto en lugares especiales como es el caso de pasos a desnivel.

La relación que existe entre la velocidad global y la relación v/c , se emplea en este caso, para analizar el nivel de servicio en forma similar a como se hizo para las carreteras. La Figura 6.64 muestra esta relación para arterias urbanas y suburbanas.

La curva I representa condiciones de circulación continua en arterias suburbanas sin control de semáforos, en las que el límite máximo de la velocidad es de 60 km/h o en arterias urbanas controladas con semáforos, en las que existe una progresión razonablemente buena de los semáforos.

La curva II representa condiciones de circulación discontinua. Los semáforos están espaciados normalmente a distancia de 800 m o menos, sin que exista interconexión entre ellos. La velocidad bajo condiciones de

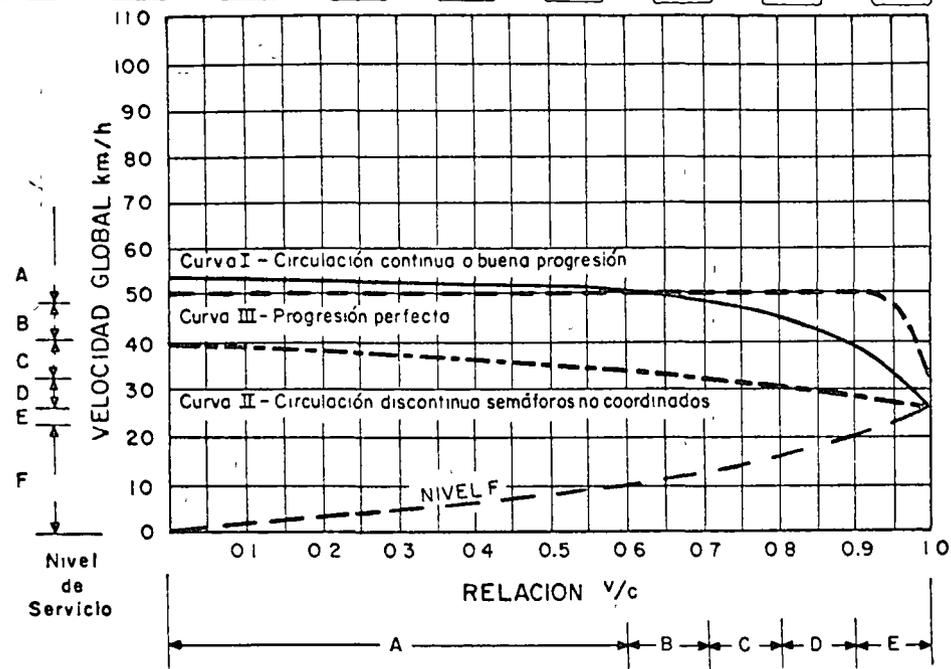


FIGURA 6.64. RELACIONES ENTRE LA VELOCIDAD GLOBAL Y LA RELACION V/C EN ARTERIAS URBANAS Y SUBURBANAS

circulación continua, está representada por la velocidad que se alcanza a la mitad de la cuadra, la cual está gobernada muchas veces por el límite máximo de la velocidad (40 km/h para el ejemplo ilustrado con la curva II).

La curva III representa una progresión perfecta con grupos de vehículos circulando a la velocidad de la progresión, la cual para el ejemplo es igual a 50 km/h.

Para la condición de circulación continua, que raras veces se presenta, la capacidad es idéntica en concepto y a menudo en valor absoluto, a las capacidades de caminos con circulación continua, discutidas en los incisos 6.5 a 6.8. Para condiciones de circulación discontinuas, la capacidad usualmente está gobernada por los dispositivos para controlar el tránsito y por las condiciones físicas de las intersecciones.

La capacidad aquí, representa fundamentalmente la máxima utilización de la arteria en aquellos intervalos de la hora en que hay indicación de luz verde, o bien, cuando la arteria está libre de otras interrupciones predecibles. Una avenida puede llegar a alojar volúmenes de tránsito cercanos a los que se encuentran bajo condiciones de circulación continua, cuando el tránsito está moviéndose con la indicación de la luz verde del semáforo; sin embargo, como el tránsito deja de circular porque el semáforo está con la indicación de luz roja, o bien, cuando el espaciamiento entre grupos de vehículos es muy grande en los casos de sistemas progresivos, la capa-

cidad en vehículos por hora es mucho menor que bajo las condiciones de circulación continua.

Cuando en un tramo de arteria urbana, con características geométricas más o menos uniformes, haya varias intersecciones controladas con semáforo y no existan diferencias radicales en la programación de ellos, es posible obtener condiciones promedio del nivel de servicio aplicables a todo el tramo (excepto para el nivel E). Sin embargo, cuando se consideran condiciones de volumen máximo (nivel E, o capacidad), no debe excederse la capacidad del punto más crítico.

La capacidad en los accesos de las intersecciones se determina con los procedimientos descritos en el inciso 6.11.

Los niveles de servicio en arterias urbanas pueden analizarse de manera semejante a la de los otros caminos, usando como criterio en este caso, la velocidad global y la relación v/c . Lo anterior implica que se analicen los niveles de operación de todos los puntos potenciales de restricción, y de un análisis del tramo en su conjunto.

Aun cuando los puntos críticos son normalmente los accesos a las intersecciones, éstos pueden presentarse también en lugares a mitad de la cuadra.

En la tabla 6-Y se muestran los niveles de servicio, relacionados en forma aproximada con el factor de carga y con el factor de la hora de máxima demanda; sin embargo, debe hacerse notar que teóricamente el factor de la hora de máxima demanda puede ocurrir a cualquier nivel de servicio, ya que éste depende más bien del grado de demanda que de su magnitud. En la tabla se muestra, además de la calidad del flujo y de los límites de las velocidades globales, la escala de valores de la relación v/c para cada uno de los niveles.

6.12.2 Elementos críticos que requieren consideración

A) Progresión del sistema de semáforos. Una progresión perfecta o casi perfecta de semáforos puede lograrse a altos volúmenes de tránsito, sólo si pueden establecerse las siguientes condiciones: 1) que existan pocos movimientos de vuelta, 2) que pueda sostenerse la demanda por ciclo, y 3) que no se presenten conflictos a mitad de la cuadra. En el caso de una progresión perfecta ningún vehículo se ve detenido por las indicaciones de la luz roja de los semáforos, por lo que se logra en la circulación, volúmenes de tránsito cercanos a los 2 000 vehículos por hora de luz verde.

La operación bajo condiciones de volúmenes altos es siempre inestable, pudiendo perderse el balance en el momento en que se produzca cualquier anomalía en la circulación del tránsito. Para cálculos de capacidad de intersecciones, bajo estas condiciones, es apropiado el uso de un factor de carga de 0.95 y de un factor de la hora de máxima demanda, también de 0.95. El factor de carga de 0.95 tiene un significado especial, indicando que casi todos los ciclos fueron totalmente utilizados. Por otra parte y refiriéndose a la curva III de la Figura 6.64, se puede apreciar que en una progresión perfecta se tiene una velocidad constante, mientras que la relación v/c varía desde cero hasta alcanzar un valor cercano a 0.95 para esa misma velocidad, lo cual indica que bajo estas condiciones los conductores no tienen objeción a que el volumen de tránsito se vaya incrementando, puesto que pueden mantener la velocidad correspondiente a la progresión perfecta. Para efectos de análisis, el valor máximo de v/c para el nivel de servicio A, en una progresión casi perfecta es de 0.80.

NIVEL DE SERVICIO	CONDICIONES DEL FLUJO DE TRANSITO				VOLUMEN DE SERVICIO- CAPACIDAD ^{a, b}
	DESCRIPCION	VELOCIDAD GLOBAL ^a (km/hora)	FACTOR DE CARGA ^a	FACTOR DE LA HORA DE MAXIMA DE MANDA ^b	(v/c)
A	FLUJO LIBRE	≥ 50	0 0	≤ 0.70	≈ 0.60 (0.80)
B	FLUJO ESTABLE	≥ 40	≤ 0.1	≤ 0.80	≈ 0.70 (0.85)
C	FLUJO ESTABLE	≥ 30	≤ 0.3	≤ 0.85	≈ 0.80 (0.90)
D	APROXIMANDOSE AL FLUJO INESTABLE	≥ 20	≤ 0.7	≤ 0.90	≈ 0.90 (0.95)
E ^d	FLUJO INESTABLE	20	≈ 1.0 (0.85) ^c	≤ 0.95	≈ 1.00
F	FLUJO FORZADO	< 20	No Significativo	No Significativo	No Significativo ^e

- a.- La velocidad global y la relación v/c son medidas independientes del nivel de servicio; deben satisfacerse ambos límites en cualquier determinación de niveles de servicio, con la debida consideración al hecho de que estas son racionalizaciones en su mayor parte. El factor de carga que es una medida de nivel de servicio en intersecciones, puede usarse como criterio suplementario cuando sea necesario.
- b.- Los valores entre paréntesis se refieren a una progresión casi perfecta.
- c.- Un factor de carga de 1.00 no se encuentra con frecuencia, aún bajo condiciones de operación a la capacidad, debido a las fluctuaciones inherentes al flujo de tránsito.
- d.- Capacidad.
- e.- La relación volumen de demanda-capacidad puede exceder 1.00, indicando sobrecarga.

TABLA 6-Y. NIVELES DE SERVICIO PARA CALLES URBANAS Y SUBURBANAS

B) Operación en un sentido y en dos sentidos. Para propósitos de comparación, es necesario que se analicen las siguientes condiciones: 1) la demanda y composición del tránsito, 2) la superficie de rodamiento, 3) el estacionamiento, 4) el señalamiento, 5) el medio ambiente, y 6) los movimientos de vuelta en todo el tramo.

En general, la operación de arterias de un sentido es más eficiente que la operación de arterias de dos sentidos con igual anchura, en términos de vehículos por hora.

C) Otras interrupciones e interferencias. A lo largo de las arterias urbanas y suburbanas existen otros elementos que afectan la circulación del tránsito; entre los más comunes están los siguientes:

- 1) Intersecciones sin control de semáforos.
- 2) Entradas y salidas en la mitad de la cuadra y movimientos de vuelta correspondientes.
- 3) Estacionamientos a mitad de la cuadra.
- 4) Lotes de estacionamiento a mitad de la cuadra.
- 5) Señales y marcas inadecuadas en el pavimento.
- 6) Falta de canalización.
- 7) Restricción en las distancias libres laterales.
- 8) Interferencias de peatones.
- 9) Maniobras de los autobuses.
- 10) Falta de aplicación del reglamento de tránsito.

Hay que señalar que hasta el momento, no existen suficientes datos que sirvan de base para determinar los factores de ajuste o de corrección para cada uno de estos elementos.

6.12.3 Procedimiento para determinar la capacidad y los niveles de servicio

A) Cálculo de la capacidad. El procedimiento para el cálculo de la capacidad es el siguiente:

1. Hágase una revisión general del tramo en estudio, estableciendo los elementos que influyan en la capacidad, tales como: intersecciones controladas con semáforo, restricciones a mitad de la cuadra ocasionadas por las interferencias del tránsito y por las condiciones geométricas y, finalmente, los subtramos entre intersecciones con longitudes mayores de 1 500 m en los que exista circulación más o menos continua.

2. Calcúlense en las intersecciones, las capacidades de los accesos más importantes con los procedimientos que se dan en el inciso 6.11 y de los subtramos con circulación continua, con los procedimientos descritos en los incisos 6.6 a 6.8. Analícese cada restricción importante a la mitad de la cuadra, como un caso especial, para lo cual pueden adoptarse los procedimientos básicos para la determinación de la capacidad de intersecciones, dados en el inciso 6.11.

3. Interpretense los resultados del análisis anterior, para establecer: a) los puntos con capacidades menores que la de la arteria en su conjunto, b) una capacidad de control, tomando como base la capacidad mínima en el tramo (excluyendo puntos de congestamiento).

4. Hágase un esfuerzo por incrementar la capacidad de los puntos de congestamiento, al valor mínimo establecido como capacidad de control para el resto del tramo. Si lo anterior no es posible, estos puntos serán los que gobiernan la capacidad.

B) Cálculo del nivel de servicio. El procedimiento para el cálculo del nivel de servicio es el siguiente:

1. Hágase una revisión general de la arteria, para determinar aquellos puntos en que las características del tránsito cambien notablemente, debido a movimientos de vuelta en las calles transversales, enlaces y otras entradas y salidas. Para propósitos de análisis, estos puntos deberán establecerse como límites dentro del tramo.

2. Calcúlese la capacidad de todas las intersecciones y de otros elementos con alguna posibilidad de influir en la operación de la arteria, de manera similar a como se indica en el apartado A) (cálculo de la capacidad); sepárense aquellos puntos de restricción anormales y establézcase un valor mínimo de control de la capacidad para el resto del tramo.

3. Determínese si el volumen de demanda general excede o no al valor mínimo de la capacidad, establecido como control en el tramo. Cuando esta capacidad no sea excedida, háganse verificaciones adicionales para determinar si alguno de los puntos de restricción anormales, separados para su análisis individual, suministran capacidades por abajo del volumen de demanda.

4. Si de acuerdo con el punto anterior, no se producen limitaciones en la capacidad, divídase el volumen de demanda entre la capacidad establecida como control, para obtener la relación v/c promedio para el tramo. Obténgase la velocidad global, de la Figura 6.64 y determínese el nivel de servicio general, de la tabla 6-Y.

Cuando haya restricciones anormales, pero éstas no limiten la capacidad, considérense en detalle para establecer los niveles de servicio correspondientes. Esto se hace a menudo con los procedimientos del inciso 6.11 cuando se trata de intersecciones, o haciendo adaptaciones en el caso de otras interrupciones; aunque a veces, pueden ser más apropiados los procedimientos para caminos con circulación continua. Interpretéense los niveles de servicio en cada punto, en términos del número de restricciones aceptado en relación con la capacidad de control obtenida para el resto del tramo. Establézcase por último, el nivel de servicio para todo el tramo, ponderando de acuerdo con las distancias de influencia de las restricciones.

5. Si de acuerdo con el punto 3, se produce una limitación en la capacidad, efectúese un análisis más detallado de ese punto de restricción, para determinar la extensión de su influencia, es decir, determínese si el efecto es solamente local, debido a movimientos de vuelta ocurriendo antes o después del punto, o bien, si se están creando condiciones de flujo forzado en la corriente antes de llegar al punto, en tanto que después de éste se tiene un nivel tolerable. Asígnese el nivel de servicio general, tomando en consideración lo anterior.

De manera inversa, para determinar en forma aproximada el volumen de servicio que puede suministrar una arteria dado el nivel de servicio, o la velocidad global deseada, deberá entrarse a la Figura 6.64 y obtener la relación v/c . Aplíquese esta relación a la capacidad de control del tramo, determinada según lo indicado con anterioridad, para obtener el volumen de servicio o de demanda que puede alojar la arteria a este nivel.

6.12.4 Solución de ejemplos típicos

Ejemplo 1.

A. Datos:

Tramo de una arteria urbana, con intersecciones controladas con semáforo.

Los anchos de las calles se muestran en el croquis.

Banqueta de 1.50 m.

Sin estacionamientos.

3% de camiones.

30 autobuses urbanos/hora; con parada de autobuses como se muestra en el croquis.

Localizada en la zona comercial fuera del centro.

Población = 500 000 habitantes.

Factor de la hora de máxima demanda = 0.85.

Interferencia de peatones: despreciable.

Características de las intersecciones y movimientos de vuelta (ver croquis).

Los tiempos de recorrido indican una velocidad global de 30 km/h.

Los volúmenes de demanda que se muestran en el croquis, sólo indican el flujo en un sentido.

B. Determínese:

1. El nivel de servicio general correspondiente a la velocidad global de 30 km/h.

2. El nivel de servicio por restricciones en las intersecciones y a mitad de la cuadra.

C. Solución:

1. De la tabla 6-Y, para una velocidad global de 30 km/h, el nivel de servicio es C, en el límite con el nivel de servicio D.

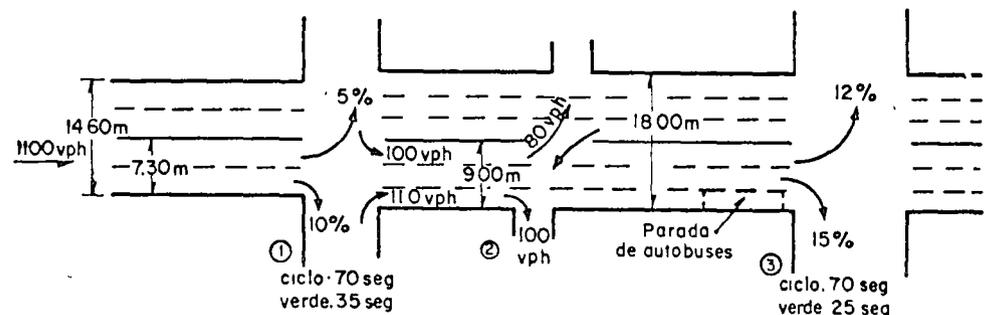
2. En el croquis se observa que la intersección 1, el área a la entrada del lote de estacionamiento 2 y la intersección 3, son los elementos principales de control de la capacidad.

Nivel de servicio en la intersección 1:

Para el análisis son aplicables los procedimientos del inciso 6.11.

Para el cálculo de nivel de servicio es necesario determinar primero, el volumen por hora de luz verde.

$$VA_{w, FC} = \frac{VS \text{ (volumen de demanda)}}{(G/C) (PAM, FHMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B)}$$



Para propósitos prácticos, los vehículos esperando para entrar al estacionamiento, bloquean continuamente el carril de la derecha y el de la izquierda. El carril del centro es bloqueado por los vehículos en sentido opuesto que entran al estacionamiento, durante el 30% de la hora.

$$VS = 1\ 100 \text{ vph (demanda en el acceso)}$$

$$G/C = 35/70 = 0.50$$

$$PAM, FHMD = 1.06 \text{ (de la tabla de la Figura 6.57)}$$

$$UC = 1.25 \text{ (de la tabla de la Figura 6.57)}$$

$$VD = 1.00 \text{ (de la tabla 6-V)}$$

$$VI = 1.05 \text{ (de la tabla 6-W)}$$

Debido a que no existe parada de autobuses, los autobuses urbanos pueden considerarse como vehículos pesados, y sumarse al por ciento de vehículos dado como dato en el ejemplo.

$$\text{Autobuses} = \frac{30}{1\ 100} = 2.7\% \doteq 3\%, \text{ por lo que:}$$

Total de vehículos pesados = 3% + 3% = 6%; el factor de ajuste correspondiente es:

$$T = 0.99 \text{ (de la tabla 6-X)}$$

Substituyendo:

$$VA_{w, FC} = \frac{1\ 100}{0.50 \times 1.06 \times 1.25 \times 1.00 \times 1.05 \times 0.99}$$

$$VA_{w, FC} = 1\ 597 \text{ vph de luz verde.}$$

Entrando a la gráfica de la Figura 6.57 con el volumen por hora de luz verde antes calculado y con el ancho del acceso en metros, se obtiene un factor de carga $FC = 0.15$, el cual corresponde a un nivel de servicio C.

De la misma Figura 6.57 se obtiene que el volumen por hora de luz verde al nivel de servicio E (capacidad) es de 2 100 vph, por lo que:

$$\frac{v}{c} = \frac{1\ 597}{2\ 100} = 0.76$$

De la tabla 6-Y, se concluye que la operación corresponde a un nivel de servicio C.

Nivel de servicio en el área a la entrada del lote de estacionamiento 2.

Debido a que los movimientos de vuelta izquierda para entrar al lote de estacionamiento, obstruyen al tránsito que va de paso, la circulación se ve sujeta a continuas paradas, tal como sucede en una intersección controlada con semáforo.

Supóngase, por lo tanto, que se trata de una intersección controlada con semáforo, sin movimientos de vuelta, ancho del acceso de 3.00 m, sin estacionamiento y 70% de luz verde (100-30).

$$VA_{w, FC} = \frac{VS \text{ (volumen de demanda)}}{(G/C) (PAM, FHMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B)}$$

$$VS = 1\ 100 - 1\ 100 (0.10 + 0.05) + 100 + 110$$

$$VS = 1\ 145 \text{ vph}$$

$G/C = 0.70$ (se considera que el tránsito sólo sufre interrupciones durante 30% del tiempo).

$$PAM, FHMD = 1.06 \text{ (de la tabla de la Figura 6.57)}$$

$$UC = 1.25 \text{ (de la tabla de la Figura 6.57)}$$

$$VD = 1.20 \text{ (de la tabla 6-V)}$$

$$VI = 1.30 \text{ (de la tabla 6-W)}$$

$$T = 0.99 \text{ (de la tabla 6-X)}$$

Substituyendo:

$$VA_{w, FC} = \frac{1\ 145}{0.70 \times 1.06 \times 1.25 \times 1.20 \times 1.30 \times 0.99} = 800 \text{ vph de luz verde}$$

Entrando a la gráfica de la Figura 6.57 con el volumen por hora de luz verde antes calculado y con el ancho del acceso en metros, se obtiene un factor de carga de 0.9, el cual corresponde a un nivel de servicio E y por consiguiente, el área a la entrada del lote de estacionamiento operará a la capacidad.

Nivel de servicio en la intersección 3:

$$VA_{w, FC} = \frac{VS \text{ (volumen de demanda)}}{(G/C) (PAM, FHMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B)}$$

$$VS = 1\ 145 - 100 - 80 = 965 \text{ vph}$$

$$G/C = 25/70 = 0.36$$

$$PAM, FHMD = 1.06 \text{ (de la tabla de la Figura 6.57)}$$

$$UC = 1.25 \text{ (de la tabla de la Figura 6.57)}$$

$$VD = 0.99 \text{ (de la tabla 6-V)}$$

$$VI = 0.98 \text{ (de la tabla 6-W)}$$

$$T = 1.02 \text{ (de la tabla 6-X para 3\% de vehículos pesados)}$$

$$B = 0.91 \text{ (de la Figura 6.59)}$$

Substituyendo:

$$VA_{w, FC} = \frac{965}{0.36 \times 1.06 \times 1.25 \times 0.99 \times 0.98 \times 1.02 \times 0.91}$$

$$VA_{w, FC} = 2\ 246 \text{ vph de luz verde}$$

Entrando a la gráfica de la Figura 6.57 con el volumen por hora de luz verde antes calculado y con el ancho del acceso en metros, se obtiene un factor de carga de 0.5, el cual corresponde a un nivel de servicio D.

De la misma Figura 6.57 se obtiene que el volumen por hora de luz verde a la capacidad es de 2 700 vph, por lo que:

$$\frac{v}{c} = \frac{2\ 246}{2\ 700} = 0.83$$

Examinando la tabla 6-Y, se concluye que la operación corresponde a un nivel de servicio D.

Conclusión:

La arteria en su conjunto tiene una operación cercana al nivel de servicio D, en tanto que las intersecciones 1 y 3 operan niveles de servicio C y D, respectivamente. Sin embargo, el área en la entrada de los estacionamientos a la mitad de la cuadra es un punto serio de interferencia, siendo esta área la que controla la capacidad en esta parte de la arteria.

6.13 ANALISIS DE CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO EN LAS CALLES DE LA ZONA COMERCIAL DEL CENTRO DE LA CIUDAD

En la zona comercial del centro de la ciudad, existen muchas calles importantes cuya función principal es dar servicio al tránsito generado por los negocios locales. En este caso, dar servicio eficiente al tránsito de paso viene a ser de importancia secundaria, aunque en ocasiones algunas calles del centro que se encuentran estratégicamente localizadas, pueden operar durante las horas de máxima demanda en forma similar a como lo hacen las arterias. Normalmente, el flujo de tránsito es más bien de movimientos circulatorios internos que de movimientos directos a través del centro; existen, además, gran cantidad de conflictos entre los volúmenes usualmente fuertes de peatones y el gran número de vehículos que dan vuelta.

Todavía no es posible desarrollar gráficas o curvas que representen las relaciones básicas velocidad-volumen, en tramos largos de calles del centro de la ciudad formados por varias cuadras. Con el conocimiento limitado que se tiene de las relaciones complejas que gobiernan al flujo de tránsito en el centro de la ciudad, ni siquiera ha sido posible obtener relaciones típicas v/c . Las capacidades de las calles del centro aparentemente similares, pueden variar bastante debido a las diferencias en las condiciones ambientales.

Las operaciones del tránsito en el centro de la ciudad, pueden caer en un nivel de servicio F, si se comparan con la escala de niveles de servicio de las arterias urbanas de primer orden, descritas en el inciso 6.12.

La operación en tramos largos de calles del centro de la ciudad, no debe relacionarse con las escalas de niveles de operación de otras calles urbanas.

Para el análisis de las calles del centro de la ciudad, en la actualidad no es posible proporcionar procedimientos para determinar el nivel de

servicio con base en el volumen de demanda. Sin embargo, se sugiere una escala de niveles de servicio para diferentes flujos del tránsito, en la calle en estudio. Esta escala se muestra en la tabla 6-Z, la cual representa el grado de aceptación del conductor, a varios niveles de operación; la tabla está basada enteramente, en las velocidades globales, no habiéndose hecho el intento de relacionarlas con los volúmenes de tránsito, debido al gran número de factores que intervendrían.

Se recomienda, para fines de determinación de la capacidad y del volumen de servicio, hacer el análisis intersección por intersección, por medio de los procedimientos descritos en el inciso 6.11 correspondiente a intersecciones controladas con semáforo. Conociendo los tiempos de recorrido y por consiguiente las velocidades globales a lo largo del tramo, de la tabla 6-Z puede obtenerse un nivel de servicio general, relacionado con el rango de niveles que se encuentran normalmente en la zona comercial del centro de la ciudad.

NIVEL DE SERVICIO	CONDICIONES DEL FLUJO DE TRANSITO	
	DESCRIPCION	VELOCIDAD GLOBAL (km/h)
A	Flujo libre	≥ 40
B	Flujo estable	≥ 30
C	Flujo estable	≥ 25
D	Aproximándose al flujo inestable	≥ 15
E ^a	Flujo inestable	Menor que 15
F	Flujo forzado	Paradas frecuentes

a) El nivel E para la calle en su conjunto, no puede considerarse como capacidad; la capacidad está gobernada por la de las intersecciones críticas o por la de otras interrupciones

TABLA 6-Z. NIVELES DE SERVICIO PARA CALLES DEL CENTRO DE LA CIUDAD

6.13.1 Solución de ejemplos típicos

Ejemplo 1.

A. Datos:

Tramo de calle con dos sentidos de circulación, localizado en la zona comercial del centro de la ciudad, en el que existen 4 intersecciones controladas con semáforo.

Los volúmenes de demanda y las características de operación en las intersecciones, se muestran en el croquis.

Estacionamiento en ambos lados.

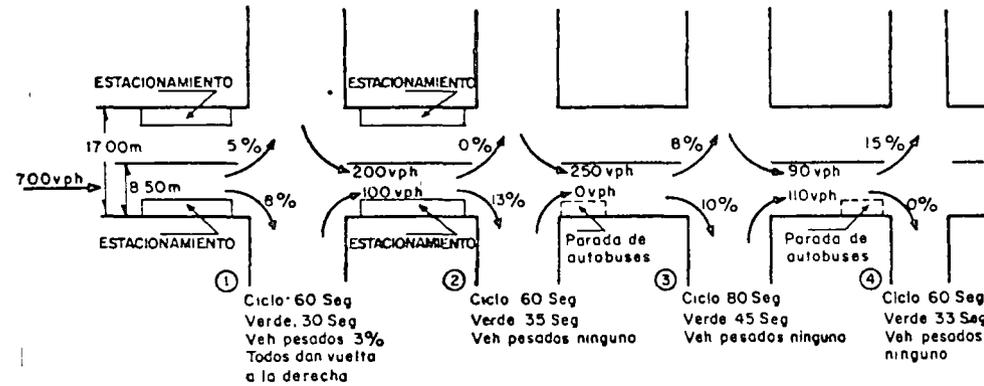
Ancho de la calle = 17.00 m de guarnición a guarnición.

Población del área metropolitana = 175 000 habitantes.

Factor de la hora de máxima demanda = 0.85.

Autobuses urbanos = 40/hora.

Vehículos pesados (ver croquis).



B. Determinese:

1. El nivel de servicio que proporciona el tramo de calle, si los recorridos indican una velocidad global de 23 km/h.
2. El volumen de servicio en los accesos a las intersecciones, para el nivel de servicio obtenido en el punto anterior.
3. La intersección que controla la operación, de acuerdo con los volúmenes de demanda indicados.

C. Solución:

1. De la tabla 6-Z, para una velocidad global de 23 km/h, el nivel de servicio es D.

2. Volumen de servicio al nivel de servicio D.

Intersección 1:

$$VS_D = (VA_{w, FC}) (G/C) (PAM, FHMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B)$$

$$w = 8.50 \text{ m}$$

$$FC = 0.7 \text{ (de la tabla 6-U, para nivel de servicio D)}$$

$$VA_{w, FC} = 1\ 550 \text{ vph de luz verde (de la Figura 6.58)}$$

$$G/C = 30/60 = 0.50$$

$$PAM, FHMD = 0.97 \text{ (de la tabla de la Figura 6.58)}$$

$$UC = 1.00 \text{ (de la tabla de la Figura 6.58)}$$

Como todos los vehículos pesados dan vuelta a la derecha, son necesarias ciertas consideraciones especiales: Si $\frac{3}{8}$ de las vueltas son vehículos

pesados y $\frac{5}{8}$ son vehículos ligeros y se considera que dos vehículos ligeros equivalen a un pesado, se tiene:

$\frac{5}{8} \times 1 + \frac{3}{8} \times 2 = \frac{11}{8}$; es decir, 11% de vehículos equivalentes dan vuelta a la derecha, por lo que:

$$VD = 0.995 \text{ (de la tabla 6-V)}$$

$$VI = 1.05 \text{ (de la tabla 6-W.)}$$

Como no hay parada de autobuses, considérense a los 40 autobuses urbanos por hora como un porcentaje respecto al volumen de servicio, calculado con los factores de ajuste obtenidos anteriormente, es decir:

$$VS = 1\ 550 \times 0.50 \times 0.97 \times 1.00 \times 0.995 \times 1.05 = 785 \text{ vph}$$

$$40/785 = 5.1 \approx 5\%$$

% total de vehículos pesados = 3% (vehículos pesados que dan vuelta a la derecha) + 5% (autobuses urbanos considerados como camiones) = 8%.

El factor de ajuste será por consiguiente:

$$T = 0.97 \text{ (de la tabla 6-X)}$$

Substituyendo:

$$VS_D = 785 \times 0.97 = 761 \text{ vph}$$

Intersección 2:

$$VS_D = (VA_{w, FC}) (G/C) (PAM, FHMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B)$$

$$w = 8.50 \text{ m}$$

$$FC = 0.7 \text{ (de la tabla 6-U, para nivel de servicio D)}$$

$$VA_{w, FC} = 1\ 550 \text{ vph de luz verde (de la Figura 6.58)}$$

$$G/C = 35/60 = 0.58$$

$$PAM, FHMD = 0.97 \text{ (de la tabla de la Figura 6.58)}$$

$$UC = 1.00 \text{ (de la tabla de la Figura 6.58)}$$

$$VD = 0.985 \text{ (de la tabla 6-V)}$$

$$VI = 1.10 \text{ (de la tabla 6-W)}$$

$$T = 1.05 \text{ (de la tabla 6-X, para 0% de camiones)}$$

$$B = 1.00 \text{ (de la Figura 6.62)}$$

Substituyendo:

$$VS_D = 1\ 550 \times 0.58 \times 0.97 \times 1.00 \times 0.985 \times 1.10 \times 1.05 \times 1.00$$

$$VS_D = 992 \text{ vph}$$

Intersección 3:

$$VS_D = (VA_{w, FC}) (G/C) (PAM, FHMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B)$$

$$w = 8.50 \text{ m}$$

$$FC = 0.7 \text{ (de la tabla 6-U, para nivel de servicio D)}$$

$$VA_{w, FC} = 2\ 250 \text{ vph de luz verde (de la Figura 6.57)}$$

$$G/C = 45/80 = 0.56$$

$$PAM, FHMD = 0.97 \text{ (de la tabla de la Figura 6.57)}$$

$$UC = 1.00 \text{ (de la tabla de la Figura 6.57)}$$

$$VD = 1.00 \text{ (de la tabla 6-V)}$$

$$VI = 1.02 \text{ (de la tabla 6-W)}$$

Siguiendo el mismo criterio que para el análisis de la intersección 1, es decir, considerando a los 40 autobuses urbanos por hora como un porcentaje del volumen de servicio calculado con los factores anteriores, se obtiene el 3% de vehículos pesados, por lo que el factor de ajuste será:

$$T = 1.02 \text{ (de la tabla 6-X)}$$

Substituyendo:

$$VS_D = 2\ 250 \times 0.56 \times 0.97 \times 1.00 \times 1.00 \times 1.02 \times 1.02$$

$$VS_D = 1\ 272 \text{ vph}$$

Intersección 4:

$$VS_D = (VA_{w, FC}) (G/C) (PAM, FHMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B)$$

$$w = 8.50 \text{ m}$$

$$FC = 0.7 \text{ (de la tabla 6-U, para nivel de servicio D)}$$

$$VA_{w, FC} = 2\ 250 \text{ vph de luz verde (de la Figura 6.57)}$$

$$G/C = 33/60 = 0.55$$

$$PAM, FHMD = 0.97 \text{ (de la tabla de la Figura 6.57)}$$

$$UC = 1.00 \text{ (de la tabla de la Figura 6.57)}$$

$$VD = 1.025 \text{ (de la tabla 6-V)}$$

$$VI = 0.95 \text{ (de la tabla 6-W)}$$

$$T = 1.05 \text{ (de la tabla 6-X, para 0% de camiones)}$$

$$B = 0.82 \text{ (de la Fig 6.59)}$$

Substituyendo:

$$VS_D = 2\ 250 \times 0.55 \times 0.97 \times 1.00 \times 1.025 \times 0.95 \times 1.05 \times 0.82$$

$$VS_D = 1\ 006 \text{ vph}$$

3. Intersección que controla la operación:

Volúmenes de servicio al nivel D:

$$\text{Intersección 1) } 761 \text{ vph}$$

$$2) 992 \text{ vph}$$

$$3) 1\ 272 \text{ vph}$$

$$4) 1\ 006 \text{ vph}$$

De acuerdo con lo anterior, la intersección 1 parece ser la que controla la operación; sin embargo, es necesaria una comparación de los volúmenes de demanda, antes de sacar las conclusiones finales.

Intersección 1:

$$700 \text{ vph} < 761 \text{ vph (} VS_D \text{) (satisfactorio)}$$

Intersección 2:

$$700 - 700(0.05 + 0.08) + 300 = 909 \text{ vph} < 992 \text{ vph (} VS_D \text{) (satisfactorio)}$$

Intersección 3:

$$909 - 909(0.13) + 250 = 1\ 041 \text{ vph} < 1\ 272 \text{ vph (} VS_D \text{) (satisfactorio)}$$

Intersección 4:

$$1\ 041 - 1\ 041(0.18) + 200 = 1\ 054 \text{ vph} > 1\ 006 \text{ vph (} VS_D \text{) (no satisfactorio)}$$

Conclusión:

Aun cuando en un principio y basándose en los volúmenes de servicio únicamente, parecía que la intersección 1 era la que controlaba, el análisis demuestra que bajo las condiciones de volúmenes de demanda que se tienen, la intersección 4 es realmente la más crítica. Esta intersección alcanzará primero la capacidad y su efecto repercutirá en otros puntos del tramo analizado.

6.11 ANALISIS DE CAPACIDAD Y VOLUMENES DE SERVICIO EN INTERSECCIONES A NIVEL CONTROLADAS CON SEMAFOROS

La intersección a nivel es uno de los elementos más importantes del sistema vial, que limitan y a menudo interrumpen la circulación del tránsito.

La cantidad de vehículos que puede pasar a través de una intersección, depende de las características geométricas y de operación de los caminos, de la influencia que tienen las condiciones ambientales sobre la experiencia y acciones del conductor, de las características de la corriente del tránsito y de las medidas para el control del tránsito.

6.11.1 Factores que afectan la capacidad y los niveles de servicio en una intersección a nivel

A) Características físicas y de operación.

1. Anchura del acceso. La anchura del acceso, más bien que el número de carriles, es el elemento con mayor influencia en la capacidad. Por consiguiente, los procedimientos que se describen en este inciso, están basados en las anchuras de los accesos y no en el número de carriles. Entendiéndose por acceso la parte de la rama utilizada por el tránsito que llega a la intersección.

2. Estacionamiento. Debido a que el estacionamiento en un acceso tiene un efecto muy pronunciado en la capacidad, se considera que su presencia o su ausencia es una condición básica que debe ser definida desde un principio, antes que se haga la evaluación de otros factores, ya que la eliminación del estacionamiento proporciona un incremento considerable de la capacidad. Si se suprime el estacionamiento en uno o en ambos lados de un acceso, la capacidad deberá evaluarse para cada condición.

La condición "Sin estacionamiento", se refiere a que no hay vehículos que permanezcan o se detengan en el acceso, a excepción del ascenso y descenso ocasional de pasajeros. "Con estacionamiento", significa que los vehículos permanecen o se detienen durante cierto período de tiempo en el acceso.

Como regla práctica, se considera que aquellos accesos en donde se permite estacionarse a menos de 75 m de la intersección, deberán considerarse dentro del grupo "Con estacionamiento".

3. Operación en uno o en dos sentidos. Existen, obviamente, diferencias importantes entre la operación en un sentido y la operación en dos

sentidos, las cuales se reflejan en la capacidad y en los volúmenes de servicio que pueden alcanzarse. Por ejemplo, en los accesos de calles con un sentido de circulación, las vueltas a la izquierda pueden hacerse con más facilidad, debido a la ausencia de tránsito en sentido contrario. Cuando las calles transversales son también de un sentido, los conflictos ocasionados por movimientos de vuelta, son menores que si hubiera dos sentidos.

Debido a las diferencias antes señaladas, los procedimientos de análisis y los factores de ajuste para estas dos condiciones se llevan a cabo por separado.

B) Condiciones ambientales. Los factores por condiciones ambientales representan aquellas características de la demanda, que se reflejan en la corriente del tránsito, las cuales no pueden cambiarse aunque se modifique el proyecto, o se alteren los dispositivos de control de la intersección. Estos factores incluyen: el factor de carga, el factor de la hora de máxima demanda, la población del área metropolitana y la ubicación dentro de la ciudad.

1. Factor de carga. El factor de carga es una medida del grado de utilización del acceso a una intersección, durante una hora de flujo máximo. Es la relación entre el número de fases verdes que están cargadas, o totalmente utilizadas por el tránsito (usualmente durante la hora máxima), y el número total de fases verdes disponibles para ese acceso durante el mismo período de tiempo. Como tal, es también una medida del nivel de servicio en el acceso, según se explicará en páginas subsecuentes.

El término "fase cargada" se usa con frecuencia para describir el grado de utilización del acceso de una intersección. Puede considerarse que la fase de luz verde de un acceso está cargada, cuando se tienen las siguientes condiciones: *a)* hay vehículos en todos los carriles, listos para cruzar la intersección cuando se prenda la luz verde y *b)* mientras sigue prendida la luz verde, siguen entrando vehículos a la intersección, sin tiempo desperdiciado o espaciamientos demasiado largos entre vehículos, debido a la ausencia de tránsito, ya sea que esta ausencia se deba a la falta de demanda o a interferencias y fricciones antes de la intersección.

2. Factor de la hora de máxima demanda. Normalmente, las variaciones de la demanda dentro de una hora pueden producir el arribo de volúmenes máximos en períodos cortos de tiempo durante la hora, los cuales exceden considerablemente al promedio. Este elemento debe tomarse en consideración con el fin de asegurar que no se formen colas largas de vehículos, durante ciertos períodos de la hora, aun cuando la capacidad en la hora no sea excedida.

3. Población del área metropolitana. Se ha observado que los accesos a intersecciones ubicadas en ciudades grandes, tienen mayor capacidad que los accesos a intersecciones con características geométricas similares, ubicadas en ciudades más pequeñas.

En general, lo anterior probablemente se deba a que los conductores en ciudades muy populosas tienen más experiencia con situaciones de altas densidades y congestionamientos de tránsito, que aquellos que operan en ciudades más pequeñas. En el procedimiento de análisis para determinar la capacidad y los volúmenes de servicio, se incluyen nueve grupos que abarcan un rango muy amplio del tamaño de la población, dependiendo del número de habitantes.

Por conveniencia, en la solución de problemas, el efecto del número de habitantes del área metropolitana y el del factor de la hora de máxima demanda, se han combinado en un solo factor de ajuste.

4. Ubicación de la intersección dentro del área metropolitana. Para propósitos de análisis, se considera que dependiendo de la ubicación de la intersección dentro del área metropolitana, el efecto es distinto sobre la capacidad de la intersección. En el procedimiento de análisis, se incluyen factores de ajuste para cuatro diferentes condiciones de la ubicación, a saber: zona comercial en el centro de la ciudad; zona circundante al centro de la ciudad, donde existen entre otras cosas bodegas de almacenes, industria ligera y núcleos con alta densidad de población; zona comercial fuera del centro; y zona residencial.

C) Características del tránsito.

1. Movimientos de vuelta. No obstante que los movimientos de vuelta están directamente relacionados con las características del tránsito, éstos pueden ser controlados con frecuencia en forma deliberada. Algunos movimientos en intersecciones aisladas pueden eliminarse totalmente, o bien, estudiarse con las técnicas de la Ingeniería de Tránsito, con el fin de lograr un incremento de la capacidad.

Debido al gran número de interrelaciones de los movimientos de vuelta con otros movimientos del tránsito y de los peatones en el área de la intersección, muchas de las cuales no se han estudiado en detalle, no es posible aún establecer un criterio definido, sobre el efecto que se tiene con esos movimientos.

a) A continuación se incluye una lista de las características de los efectos sobre la capacidad de los movimientos de vuelta a la izquierda, los cuales han sido tomados como base para determinar los factores de ajuste que se emplean en los procedimientos de cálculo.

— El efecto por vehículo en el acceso de una intersección es menor, cuando dos o más vehículos sucesivos dan vuelta a la izquierda, que cuando vehículos aislados efectúan ese mismo movimiento.

— En calles de dos sentidos, el efecto de los vehículos que dan vuelta a la izquierda se relaciona con el número de vehículos que circulan en sentido contrario.

— El efecto de una vuelta a la izquierda está relacionado con los conflictos que ocasiona la circulación de peatones.

— Un vehículo esperando para efectuar una vuelta a la izquierda causa una reducción de capacidad más grande en una calle estrecha que en una calle ancha o en una que tenga una isleta separadora, con un carril especial para dar vuelta a la izquierda.

— La anchura de la calle transversal afecta a la velocidad de los vehículos que dan vuelta. En una calle ancha, las velocidades son más altas, debido a que los radios de giro son mayores y hay más espacio para alojar a los vehículos que dan vuelta a la izquierda.

b) Las vueltas a la derecha influyen también en la capacidad, dependiendo de las condiciones en la intersección. Aun cuando en este caso el tránsito en sentido contrario no tiene ningún efecto, las influencias son muy parecidas a las de las vueltas a la izquierda, y son:

— Dos o más vehículos sucesivos dando vuelta, tienen mayor efecto que si dieran la vuelta aisladamente.

— Los movimientos de vuelta a la derecha se ven afectados por los movimientos de peatones. Algunas veces, el efecto es mayor que en el caso de vueltas a la izquierda, debido a que el conflicto se produce a menudo con grupos grandes de peatones que intentan cruzar la calle.

— Un vehículo que da vuelta a la derecha causa una reducción de la capacidad, más grande en una calle ancha que en una calle estrecha.

— La influencia de la anchura de la calle transversal angosta puede ser mayor para vueltas a la derecha que para vueltas a la izquierda, debido a que el radio de giro disponible es menor. Por otra parte, cuando la interferencia de peatones es pequeña y existe un radio de giro adecuado, o donde se permite la vuelta continua a la derecha, existe un aumento en la capacidad al incrementarse el número de vueltas a la derecha, particularmente cuando la calle transversal es ancha y los vehículos que dan vuelta a la derecha libran la intersección más rápidamente que los vehículos que van de frente.

2. Vehículos pesados. Para propósitos de análisis, dentro de esta categoría quedan comprendidos los camiones y autobuses foráneos.

La presencia de vehículos pesados tiende a reducir las capacidades de los accesos de una intersección, debido a que aceleran más lentamente, además de ocupar mayor espacio que los vehículos ligeros. La magnitud del efecto es muy variable, dependiendo del tipo de vehículos, de su relación peso-potencia y en particular, de su tamaño y de su radio de giro.

Sin embargo, debido a que existen pocas investigaciones detalladas en este campo, en los procedimientos de cálculo se proporcionan únicamente factores de ajuste aproximados.

3. Autobuses urbanos. Los autobuses urbanos tienen un efecto completamente diferente sobre la capacidad de las calles de la ciudad que el producido por los autobuses foráneos, considerados como camiones.

El efecto específico que los autobuses urbanos tienen sobre la capacidad de una intersección en particular, depende de la zona de la ciudad en donde se encuentre ubicada la intersección, del ancho de la calle, de las condiciones de estacionamiento, del número de autobuses y de la ubicación de la parada de autobuses.

En general, cuando el volumen de autobuses urbanos es apreciable, las paradas de autobuses localizadas en la esquina antes de llegar a la intersección, tendrán un efecto más desfavorable en la capacidad, que una parada ubicada pasando la intersección. En los procedimientos de cálculo que se indican en las siguientes páginas, se incluyen los métodos para hacer los ajustes necesarios, en las dos condiciones antes mencionadas.

D) Medidas de control. Estas incluyen:

1. Semáforos. El semáforo ordinario regula la circulación del tránsito, a través de la siguiente secuencia de indicaciones: luz verde (siga), luz ámbar (preventiva), y luz roja (alto). En el caso más simple, los tiempos de duración de cada una de las indicaciones de la secuencia es fija, no existiendo interconexión con otros semáforos. Por otra parte, en instalaciones complejas, cada movimiento puede ser gobernado por su propia serie específica de indicaciones; el tiempo de duración de cada indicación puede ser variable y el semáforo probablemente esté interconectado con otros semáforos.

Prácticamente, cualquier semáforo despliega indicaciones periódicas de luz roja, durante las cuales los vehículos dejan de circular. Obviamente, estos periodos de rojo reducen la cantidad de tránsito que puede pasar por el acceso de una intersección durante una hora, en proporción aproximada al porcentaje del tiempo total. Por consiguiente "vehículos por hora", refiriéndose a la hora efectiva, no es una medida adecuada de la circulación, en una intersección controlada con semáforo. La medida normalmente usada es "vehículos por hora de luz verde del semáforo".

La influencia principal de un semáforo en la capacidad de un acceso particular, en términos de vehículos por hora de luz verde, radica en el grado en el cual detiene a los vehículos en movimiento. Por una parte, si todos los vehículos haciendo uso del acceso son detenidos antes de entrar en la intersección, como puede ocurrir en un semáforo aislado, muy difícilmente pueden pasar a través de la intersección más de 1 500 vehículos por hora de luz verde, por carril. Por otra parte, si ningún vehículo es detenido, como puede ser el caso de un sistema debidamente sincronizado, puede obtenerse una capacidad de 2 000 vehículos por hora de luz verde, por carril. Los volúmenes por hora efectiva serán, desde luego, menores en ambos casos.

Los procedimientos de cálculo que se dan en este inciso, son aplicables a intersecciones aisladas con semáforos, considerando que existe cierto grado de coordinación con los semáforos de otras intersecciones.

a) Programación del semáforo. El tiempo que se proporciona a cada una de las indicaciones de luz del semáforo en una intersección simple, tiene una gran influencia en el número de vehículos que puede alojar cada uno de los accesos de la misma. No obstante que el elemento de cálculo que se usa en el análisis, es la parte de la hora en que el semáforo está en luz verde para el acceso en estudio, deben considerarse otros aspectos de la programación que afectan a la capacidad.

b) Longitud del ciclo. Es el tiempo total requerido para una secuencia completa de las indicaciones de luz del semáforo (verde + ámbar + rojo). En general, la longitud del ciclo deberá mantenerse tan corta como sea posible, sin dejar de satisfacer la demanda de cada uno de los movimientos vehiculares necesarios para la operación total de la intersección. Las longitudes típicas del ciclo durante periodos fuera de los máximos, varían entre 50 y 60 seg. Rara vez es factible operar con longitudes del ciclo menores de 40 segundos o con tiempos de luz verde para movimientos individuales menores de 15 segundos. Longitudes del ciclo mayores de 60 segundos se requieren a veces para acomodar movimientos múltiples en intersecciones complicadas, con el fin de proporcionar tiempos de luz verde más largos en aquellos accesos con volúmenes de tránsito altos, o para operar varias intersecciones simultáneamente. Sin embargo, los ciclos largos tienden a incrementar la demora total en la intersección (principalmente al formarse colas demasiado largas en la calle secundaria).

La máxima eficiencia se logra fundamentalmente con la menor longitud posible del ciclo. En la práctica, sin embargo, puede llegar en algunos casos a ser bastante largo, lo que hace necesario hacer un análisis cuidadoso para elegir la longitud del ciclo y la división del mismo, de manera tal, que se logre una utilización balanceada y efectiva del tiempo de luz verde en todos los accesos.

c) Relación tiempo de luz verde al ciclo (relación G/C). Este es un factor importante que se emplea en el cálculo de la capacidad, para convertir vehículos por hora de luz verde, a vehículos por hora efectiva. Con excepción de los semáforos accionados por el tránsito, la longitud del ciclo y/o la división del mismo, no sufre modificaciones dentro de los períodos máximos, de tal manera que el intervalo de luz verde para una fase cualquiera dividido por la longitud del ciclo, proporciona la relación G/C , para los vehículos del acceso que se mueven durante ese intervalo.

2. Número de carriles por acceso. Como ya se mencionó con anterioridad, el ancho del acceso ha probado tener mayor influencia en la capacidad, que el número de carriles; sin embargo, se han determinado algunas relaciones entre el número de carriles y la capacidad.

En la siguiente tabla se indica el número de carriles necesarios de acuerdo con el ancho del acceso, para alojar volúmenes óptimos de tránsito.

<i>Ancho del acceso en metros</i>		<i>Núm. de carriles</i>
Hasta	5.00	1
	5.50 a 7.50	2
	8.00 a 12.00	3
	12.50 a 16.50	4

6.11.2 Capacidad, volúmenes de servicio y niveles de servicio

Aunque para la mayor parte de los elementos de un camino se emplea la velocidad de los vehículos como una medida del nivel de servicio, tratándose de intersecciones a nivel con semáforos, su uso es poco práctico, debido a que estos dispositivos provocan altos intencionalmente. En este tipo de intersecciones, la mejor medida para el nivel de servicio es el factor de carga, por ser éste el más evidente para el conductor promedio.

Las condiciones de operación en este tipo de intersecciones para cada nivel de servicio son las siguientes:

En el nivel de servicio A, no hay fases cargadas (el factor de carga es 0.0) y sólo unas cuantas fases se acercan a esta condición. Ninguna fase del acceso es totalmente utilizada por el tránsito y no hay vehículos que esperen más de una indicación de luz roja del semáforo.

En el nivel de servicio B, la operación es estable, con un factor de carga no mayor de 0.1; ocasionalmente se utiliza totalmente una fase del acceso y un número importante de éstas se aproxima a la utilización total.

En el nivel de servicio C, continúa la operación estable. La carga de las fases es todavía intermitente, aunque más frecuente, con factores de carga que varían entre 0.1 y 0.3. Ocasionalmente algunos conductores tendrán que esperar más de una indicación de luz roja, pudiendo formarse algunas colas de los vehículos que van a dar vuelta. Muchos conductores se sienten restringidos en cierto modo, pero sin presentar objeciones. Este es el nivel de servicio que normalmente se utiliza para fines de proyecto en zonas urbanas.

En el nivel de servicio D, las restricciones son cada vez mayores, aproximándose a la inestabilidad en los límites donde el factor de carga alcanza el valor de 0.70. Las demoras de los vehículos que se aproximan pueden ser mayores durante cortos periodos dentro del periodo máximo, pero ocurren suficientes ciclos con poca demanda que permiten la disipación de colas.

En el nivel de servicio E, se alcanza la capacidad o sea, el mayor número de vehículos que puede alojar cualquier acceso de la intersección. Aun cuando teóricamente la capacidad equivale a tener un factor de carga de 1.0, en la práctica rara vez se produce una total utilización de las fases. Un factor de carga de 0.7 a 1.0 es por consiguiente más realista. Se recomienda el uso de un factor de carga de 0.85.

En el nivel de servicio F, el congestionamiento es total. La formación de colas después de la intersección, o en la calle transversal, puede restringir el movimiento de vehículos fuera del acceso que se está considerando; de ahí, que no puedan predecirse los volúmenes que puede alojar la intersección. En este caso no puede establecerse un valor para el factor de carga.

En la tabla 6-U se sintetiza el criterio de niveles de servicio descrito anteriormente:

NIVEL DE SERVICIO	CARACTERISTICAS DE LA CIRCULACION	FACTOR DE CARGA
A.....	Libre	0.0
B.....	Estable.....	0.1
C.....	Estable.....	0.3
D.....	Poco estable.....	0.7
E (capacidad)....	Inestable.....	1.0
F.....	Forzada	No aplicable

TABLA 6-U. NIVELES DE SERVICIO Y FACTORES DE CARGA PARA INTERSECCIONES A NIVEL, AISLADAS, CONTROLADAS CON SEMAFORO

6.11.3 Procedimientos para estimar la capacidad, los volúmenes de servicio y los niveles de servicio en intersecciones urbanas

A) Cuando no existen carriles ni fases del semáforo especiales para dar vuelta. Las Figuras 6.54 a 6.58, así como las tablas que están incluidas en ellas, permiten la determinación de la capacidad y de los volúmenes de servicio por hora de luz verde, en calles de uno y de dos sentidos, con o sin estacionamiento, cuando se tienen como datos el ancho del acceso, el factor de carga, el factor de la hora de máxima demanda, la población del área metropolitana y la ubicación dentro de la ciudad.

Las gráficas fueron elaboradas suponiendo las siguientes condiciones medias:

Del lugar: factor de la hora de máxima demanda 0.85; población del área metropolitana 250 000 habitantes y ubicación en la zona comercial del centro.

Del tránsito: 10% de vueltas a la derecha, 10% de vueltas a la izquierda, 5% de vehículos pesados (camiones y autobuses foráneos) y ningún autobús urbano.

Para obtener resultados que reflejen las condiciones de operación de la intersección en estudio, los valores obtenidos de las gráficas deberán afectarse, multiplicándolos por los factores de ajuste correspondientes.

Es importante señalar que, como el volumen obtenido está en vehículos por hora de luz verde, su uso no es práctico para efectos de análisis de la operación de un acceso. Este valor deberá multiplicarse siempre por la relación G/C apropiada para el acceso que se esté considerando, con el fin de determinar la capacidad o volumen de servicio, por hora efectiva.

De acuerdo con lo anterior, la capacidad o el volumen de servicio en cualquier acceso de una intersección controlada con semáforo, puede obtenerse con la siguiente expresión:

$$VS = (VA_{w,FC}) (G/C) (PAM, FHMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B)$$

en la cual:

VS = Volumen de servicio en el acceso (tránsito mixto en vph).

$VA_{w,FC}$ = Volumen por hora de luz verde en el acceso, en función del ancho w y del factor de carga FC , obtenido de las Figuras 6.54 a 6.58.

(G/C) = Relación luz verde-ciclo.

$(PAM, FHMD)$ = Factor de ajuste combinado, por población del área metropolitana (PAM) y por factor de la hora de máxima demanda ($FHMD$), obtenido de las tablas incluidas en las Figuras 6.54 a 6.58.

UC = Factor de ajuste por la ubicación dentro de la ciudad, obtenido de las tablas incluidas en las Figuras 6.54 a 6.58.

VD = Factor de ajuste por porcentaje de vueltas derechas, obtenido de la tabla 6-V.

VI = Factor de ajuste por porcentaje de vueltas izquierdas, obtenido de la tabla 6-V o 6-W, según el caso.

T = Factor de ajuste por vehículos pesados (camiones y autobuses foráneos), obtenido de la tabla 6-X.

B = Factor de ajuste por autobuses urbanos, obtenido de las Figuras 6.59, 6.60, 6.61 o 6.62, según el caso.

El nivel de servicio se obtiene despejando de la misma expresión el volumen por hora de luz en el acceso ($VA_{w,FC}$); con este volumen y con el ancho del acceso considerado, se entra a la gráfica apropiada de las Figuras 6.54 a 6.58; la intersección de estos dos valores permitirá conocer el factor de carga y , por consiguiente, el nivel de servicio buscado (tabla 6-U).

Es importante señalar que, en este caso, VS es el volumen de demanda en vph en el acceso considerado.

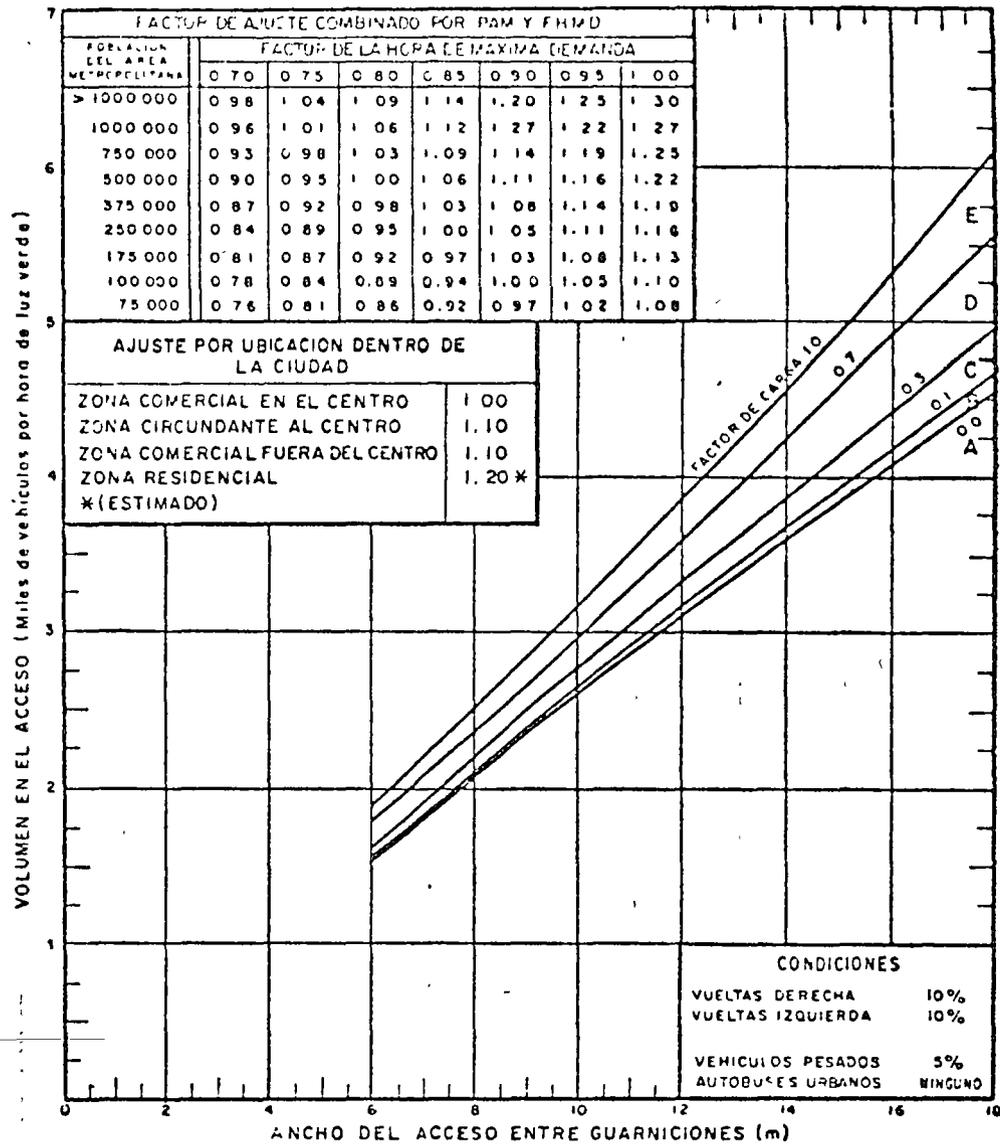


FIGURA 6.54. VOLUMEN DE SERVICIO PARA EL ACCESO A UNA INTERSECCION URBANA, EN VEHICULOS POR HORA DE LUZ VERDE, PARA CALLES DE UN SENTIDO DE CIRCULACION SIN ESTACIONAMIENTO

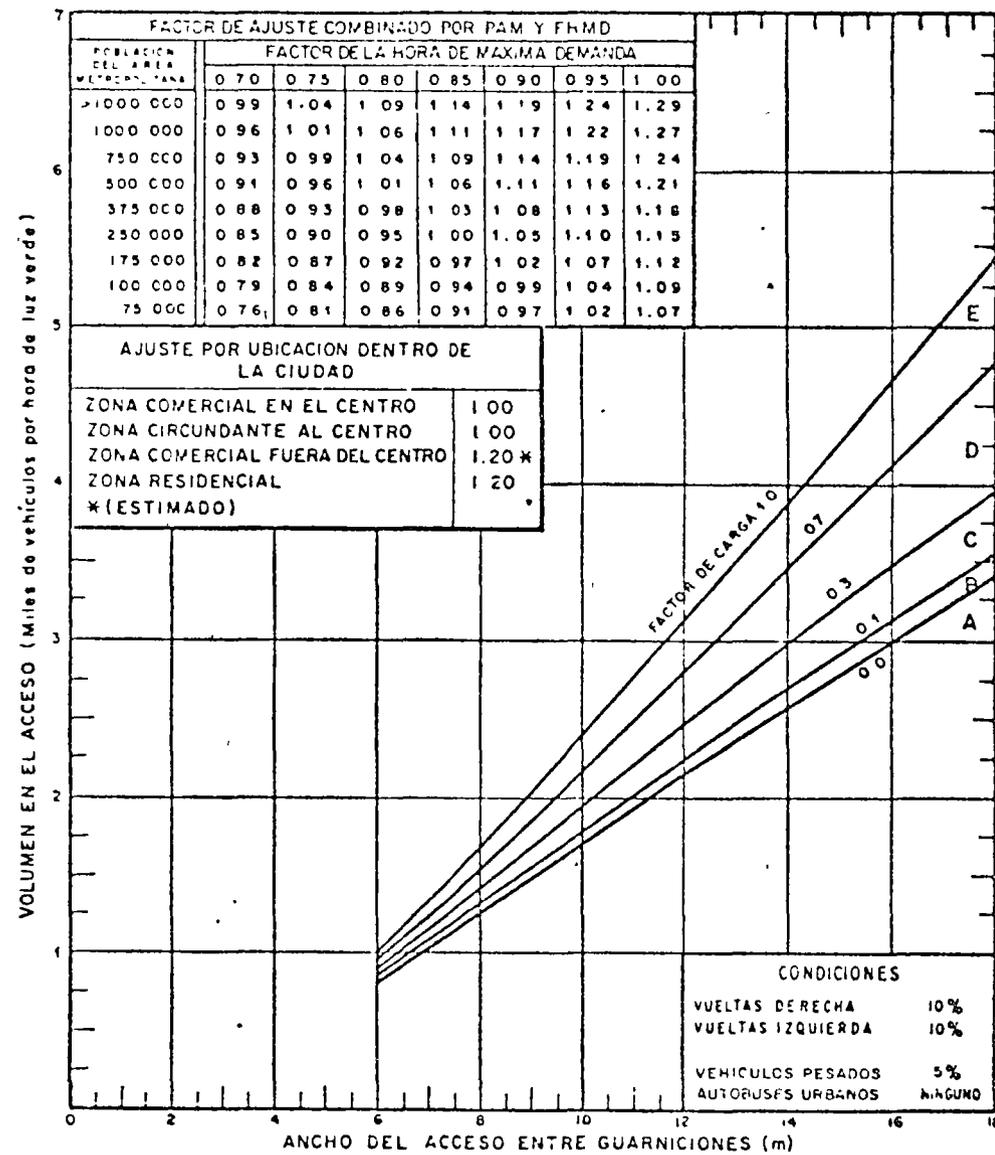


FIGURA 6.55. VOLUMEN DE SERVICIO PARA EL ACCESO A UNA INTERSECCION URBANA, EN VEHICULOS POR HORA DE LUZ VERDE, PARA CALLES DE UN SENTIDO DE CIRCULACION CON ESTACIONAMIENTO EN UN LADO

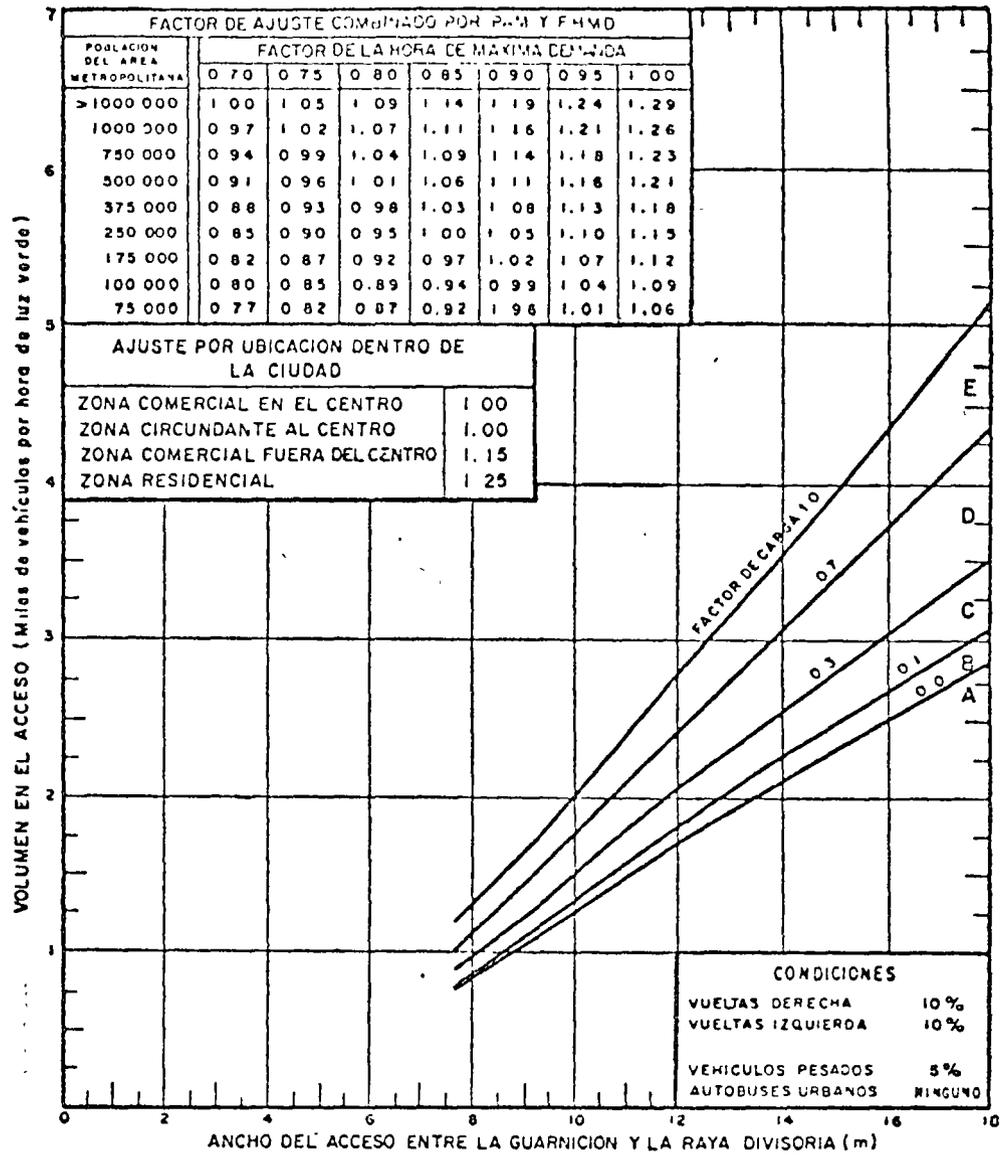


FIGURA 6.56. VOLUMEN DE SERVICIO PARA EL ACCESO A UNA INTERSECCION URBANA, EN VEHICULOS POR HORA DE LUZ VERDE, PARA CALLES DE UN SENTIDO DE CIRCULACION CON ESTACIONAMIENTO EN AMBOS LADOS

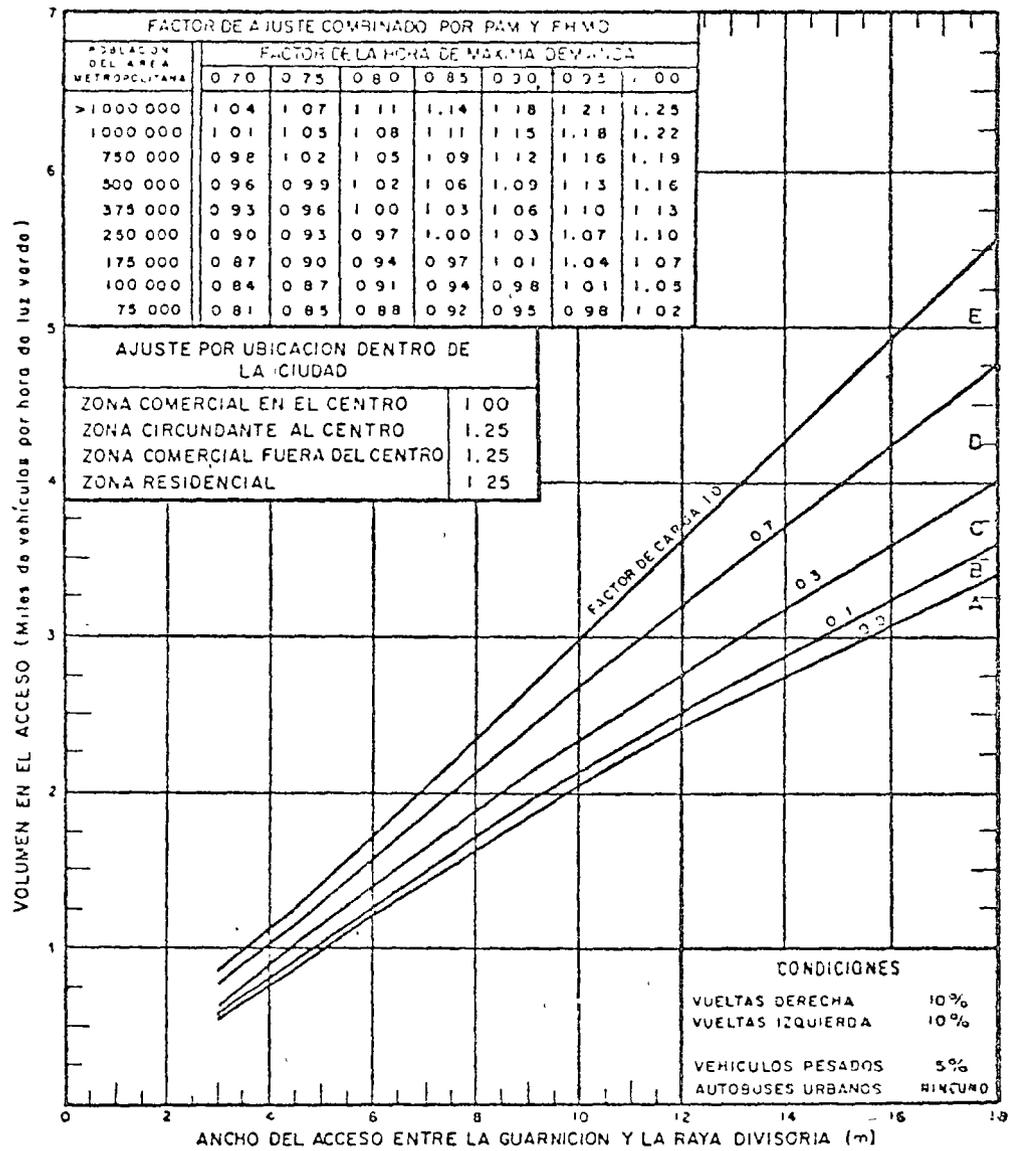


FIGURA 6.57. VOLUMEN DE SERVICIO PARA EL ACCESO A UNA INTERSECCION URBANA, EN VEHICULOS POR HORA DE LUZ VERDE, PARA CALLES DE DOS SENTIDOS DE CIRCULACION SIN ESTACIONAMIENTO

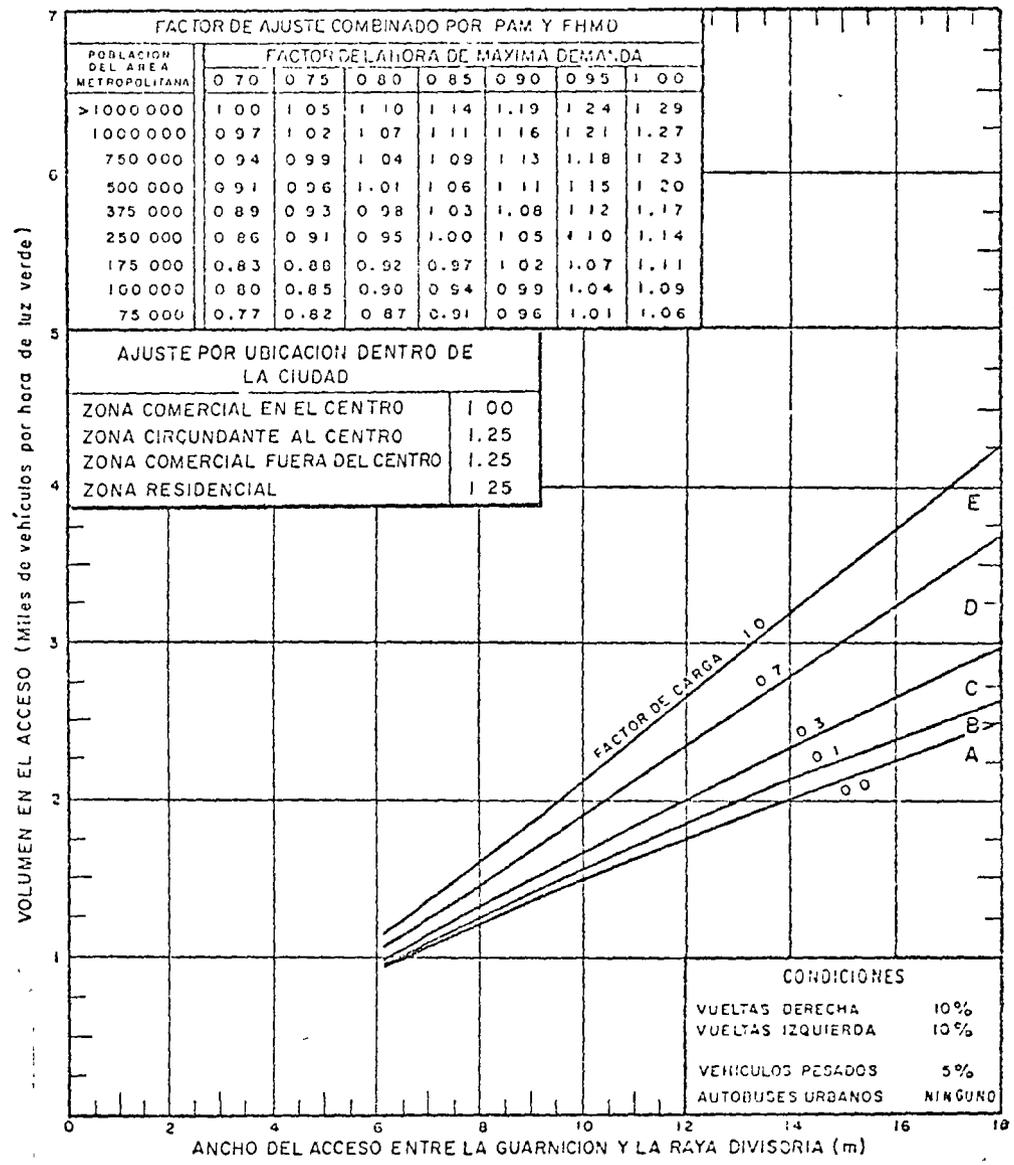


FIGURA 6.58. VOLUMEN DE SERVICIO PARA EL ACCESO A UNA INTERSECCION URBANA, EN VEHICULOS POR HORA DE LUZ VERDE, PARA CALLES DE DOS SENTIDOS DE CIRCULACION CON ESTACIONAMIENTO

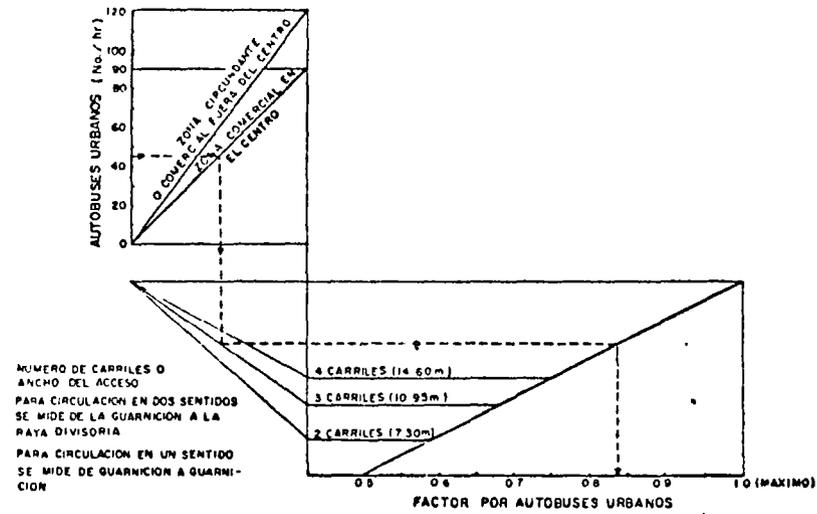


FIGURA 6.59. FACTORES DE AJUSTE POR AUTOBUSES URBANOS CON PARADA ANTES DE CRUZAR LA CALLE Y SIN ESTACIONAMIENTO

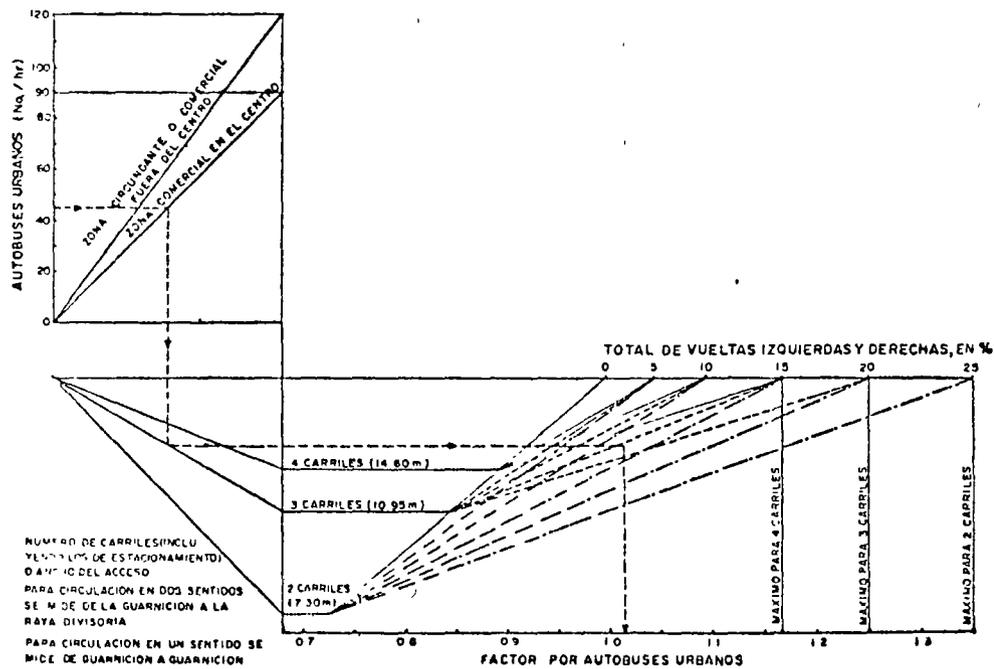


FIGURA 6.60. FACTORES DE AJUSTE POR AUTOBUSES URBANOS CON PARADA ANTES DE CRUZAR LA CALLE Y CON ESTACIONAMIENTO

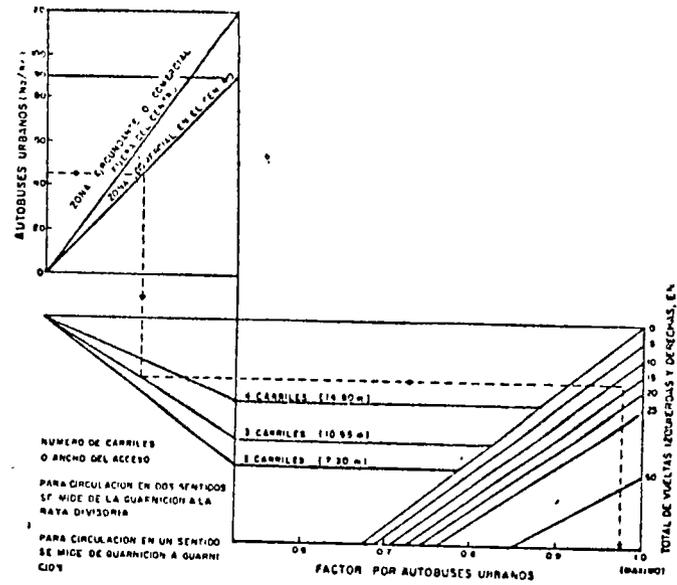


FIGURA 6.61. FACTORES DE AJUSTE POR AUTOBUSES URBANOS CON PARADA DESPUES DE CRUZAR LA CALLE Y SIN ESTACIONAMIENTO

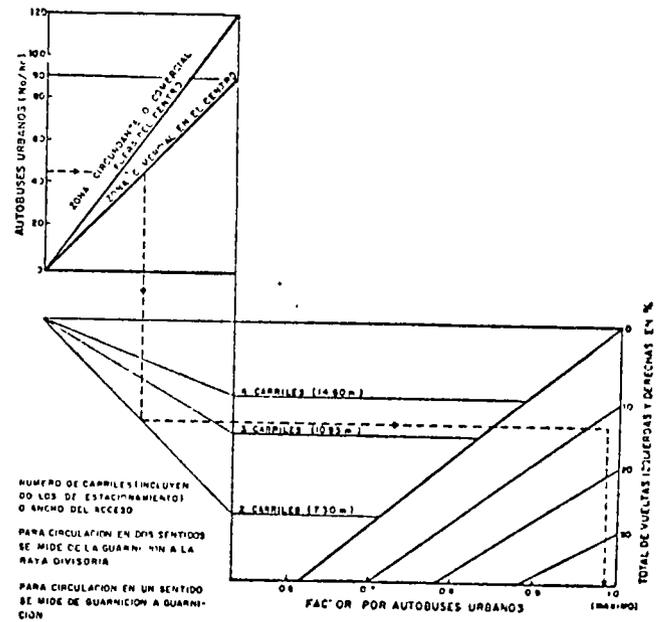


FIGURA 6.62. FACTORES DE AJUSTE POR AUTOBUSES URBANOS CON PARADA DESPUES DE CRUZAR LA CALLE Y CON ESTACIONAMIENTO

VUELTAS ^b %	FACTOR DE AJUSTE ^a					
	SIN ESTACIONAMIENTO ^c			CON ESTACIONAMIENTO ^d		
	ANCHO DEL ACCESO ≤ 450m	ANCHO DEL ACCESO 500 a 750m	ANCHO DEL ACCESO 800 a 1050m	ANCHO DEL ACCESO ≤ 6 00 m	ANCHO DEL ACCESO 650 a 900m	ANCHO DEL ACCESO 9.50 a 12 00m
0	1.20	1.050	1.025	1.20	1.050	1.025
1	1.18	1.045	1.020	1.18	1.045	1.020
2	1.16	1.040	1.020	1.16	1.040	1.020
3	1.14	1.035	1.015	1.14	1.035	1.015
4	1.12	1.030	1.015	1.12	1.030	1.015
5	1.10	1.025	1.010	1.10	1.025	1.010
6	1.08	1.020	1.010	1.08	1.020	1.010
7	1.06	1.015	1.005	1.06	1.015	1.005
8	1.04	1.010	1.005	1.04	1.010	1.005
9	1.02	1.005	1.000	1.02	1.005	1.000
10	1.00	1.000	1.000	1.00	1.000	1.000
11	0.99	0.995	1.000	0.99	0.995	1.000
12	0.98	0.990	0.995	0.98	0.990	0.995
13	0.97	0.985	0.995	0.97	0.985	0.995
14	0.96	0.980	0.990	0.96	0.980	0.990
15	0.95	0.975	0.990	0.95	0.975	0.990
16	0.94	0.970	0.985	0.94	0.970	0.985
17	0.93	0.965	0.985	0.93	0.965	0.985
18	0.92	0.960	0.980	0.92	0.960	0.980
19	0.91	0.955	0.980	0.91	0.955	0.980
20	0.90	0.950	0.975	0.90	0.950	0.975
22	0.89	0.940	0.980	0.89	0.940	0.980
24	0.88	0.930	0.985	0.88	0.930	0.985
26	0.87	0.920	0.990	0.87	0.920	0.990
28	0.86	0.910	0.995	0.86	0.910	0.995
30 o más	0.85	0.900	1.000	0.85	0.900	1.000

a) Sin carriles especiales para vueltas o indicaciones especiales del semáforo.

b) Considérense las vueltas a la derecha y a la izquierda separadamente. No se sumen.

c) No es necesario el ajuste para anchos del acceso mayores de 10.50 m

d) No es necesario el ajuste para anchos del acceso mayores de 12.00 m

TABLA 6-V. FACTORES DE AJUSTE POR VUELTAS A LA DERECHA EN CALLES DE DOS SENTIDOS, VUELTAS A LA DERECHA EN CALLES DE UN SENTIDO Y VUELTAS A LA IZQUIERDA EN CALLES DE UN SENTIDO

VUELTAS %	FACTOR DE AJUSTE ^a					
	SIN ESTACIONAMIENTO			CON ESTACIONAMIENTO		
	ANCHO DEL ACCESO ≤ 4.50m	ANCHO DEL ACCESO 5.00 a 10.50m	ANCHO DEL ACCESO ≥ 11.00m	ANCHO DEL ACCESO ≤ 6.00m	ANCHO DEL ACCESO 6.50 a 12.00m	ANCHO DEL ACCESO ≥ 12.50m
0	1.30	1.10	1.050	1.30	1.10	1.050
1	1.27	1.09	1.045	1.27	1.09	1.045
2	1.24	1.08	1.040	1.24	1.08	1.040
3	1.21	1.07	1.035	1.21	1.07	1.035
4	1.18	1.06	1.030	1.18	1.06	1.030
5	1.15	1.05	1.025	1.15	1.05	1.025
6	1.12	1.04	1.020	1.12	1.04	1.020
7	1.09	1.03	1.015	1.09	1.03	1.015
8	1.06	1.02	1.010	1.06	1.02	1.010
9	1.03	1.01	1.005	1.03	1.01	1.005
10	1.00	1.00	1.000	1.00	1.00	1.000
11	0.98	0.99	0.995	0.98	0.99	0.995
12	0.96	0.98	0.990	0.96	0.98	0.990
13	0.94	0.97	0.985	0.94	0.97	0.985
14	0.92	0.96	0.980	0.92	0.96	0.980
15	0.90	0.95	0.975	0.90	0.95	0.975
16	0.89	0.94	0.970	0.89	0.94	0.970
17	0.88	0.93	0.965	0.88	0.93	0.965
18	0.87	0.92	0.960	0.87	0.92	0.960
19	0.86	0.91	0.955	0.86	0.91	0.955
20	0.85	0.90	0.950	0.85	0.90	0.950
22	0.84	0.89	0.940	0.84	0.89	0.940
24	0.83	0.88	0.930	0.83	0.88	0.930
26	0.82	0.87	0.920	0.82	0.87	0.920
28	0.81	0.86	0.910	0.81	0.86	0.910
30 ó más	0.80	0.85	0.900	0.80	0.85	0.900

a) Sin carriles especiales para vueltas o indicaciones especiales del semáforo

TABLA 6-W. FACTORES DE AJUSTE POR VUELTAS A LA IZQUIERDA EN CALLES DE DOS SENTIDOS

CAMIONES Y AUTOBUSES FORANEOS %	FACTOR DE AJUSTE	CAMIONES Y AUTOBUSES FORANEOS %	FACTOR DE AJUSTE	CAMIONES Y AUTOBUSES FORANEOS %	FACTOR DE AJUSTE
0	1.05	7	0.98	14	0.91
1	1.04	8	0.97	15	0.90
2	1.03	9	0.96	16	0.89
3	1.02	10	0.95	17	0.88
4	1.01	11	0.94	18	0.87
5	1.00	12	0.93	19	0.86
6	0.99	13	0.92	20	0.85

TABLA 6-X. FACTORES DE AJUSTE POR CAMIONES Y AUTOBUSES FORANEOS

B) Cuando existen carriles especiales para vueltas controladas con semáforo. El procedimiento a seguir, es el siguiente:

1. Dedúzcase del ancho del acceso el ancho del carril o carriles especiales para dar vuelta. Calcúlese el volumen de servicio correspondiente al ancho que resulte, siguiendo el mismo procedimiento indicado en el apartado A), pero considerando 0% de vueltas.

2. Considérese que un carril especial para dar vuelta tiene los siguientes volúmenes de servicio:

Nivel de servicio	Vehículos por hora de luz verde (un carril)	Vehículos pesados (%)
A, B, C,	800	5
D	1000	5
E (capacidad)	1200	5

Aplicúese la relación G/C correspondiente a la indicación de luz verde para vueltas y el factor de ajuste apropiado obtenido de la tabla 6-X para porcentajes de vehículos pesados diferentes del 5%.

Cuando existen dos o más carriles especiales para dar vuelta, al primer carril se le asignan los valores de la tabla y a los demás se les asigna el 80% del valor del primer carril.

3. Súmense los volúmenes de servicio calculados de acuerdo con lo indicado en los puntos 1 y 2, para obtener el volumen de servicio total para el acceso.

C) Cuando existen carriles especiales para vueltas que no estén controladas por el semáforo. El procedimiento a seguir es el siguiente:

1. Dedúzcase del ancho del acceso, el ancho del carril o carriles especiales para dar vuelta. Calcúlese el volumen de servicio correspondiente al ancho que resulte, siguiendo el mismo procedimiento indicado en el apartado A), pero considerando 0% de vueltas.

2. En este caso se presentan dos variantes:

a) Con un carril especial para vueltas a la derecha: para cualquier nivel de servicio, úsese un valor igual a $600 \times G/C$ en vehículos por hora, suponiendo 5% de vehículos pesados en caso de que las vueltas deban efectuarse simultáneamente con el cruce de peatones. Si no existe cruce con peatones, úsense los valores que se dan para la condición en que exista control del semáforo, ver apartado B). Hágase el ajuste por vehículos pesados, aplicando los factores de la tabla 6-X.

b) Con un carril especial para vueltas a la izquierda: para cualquier nivel de servicio, considérese el volumen de servicio como la diferencia entre 1 200 vehículos y el volumen total de tránsito en sentido contrario, en términos de vehículos ligeros por hora de luz verde, pero no menos de dos vehículos por cada ciclo del semáforo; aplíquese la relación G/C según sea el caso, y hágase el ajuste por vehículos pesados, aplicando los factores de la tabla 6-X.

3. Súmense los volúmenes de servicio calculados de acuerdo con lo indicado en los puntos 1, 2 a) y 2 b), para obtener el volumen de servicio total para el acceso.

D) Cuando no existan carriles especiales para vueltas pero existe control del semáforo. Esta situación se presenta cuando se permiten movimientos de vuelta en intervalos diferentes al de la fase del semáforo para el tránsito que sigue de frente, por medio de flechas dentro de la indicación de luz verde, aun cuando no existan carriles especiales para dar vuelta. Esto ocurre también, cuando el tránsito en dirección opuesta no tiene periodos simultáneos de luz verde.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

1. Cuando exista tránsito en sentido contrario, aplíquese el procedimiento indicado en el apartado A) para el cálculo de volúmenes de servicio, considerando el ancho del acceso.

2. Cuando no exista tránsito en sentido contrario, aplíquese también el procedimiento indicado en el apartado A) para el cálculo de volúmenes de servicio, considerando las vueltas a la izquierda como vueltas en calles de un solo sentido.

3. Súmense los volúmenes de servicio calculados de acuerdo con lo indicado en los puntos 1 y 2, para obtener el volumen de servicio total en el acceso.

6.11.4 Procedimientos para estimar la capacidad, los volúmenes de servicio y los niveles de servicio en intersecciones rurales

Para intersecciones en zonas rurales, se toma como base para el cálculo la Figura 6.63, la cual permite la determinación de la capacidad y de los volúmenes de servicio en este tipo de intersecciones. Esta gráfica ha sido elaborada suponiendo un valor de 0.7 para el factor de la hora de máxima demanda y sin estacionamiento en el camino. Además, se supusieron las siguientes condiciones del tránsito: 10% de vueltas a la derecha, 10% de vueltas a la izquierda y 5% de vehículos pesados. Para condiciones distintas de las mencionadas, los resultados que se obtengan de la gráfica, deberán afectarse por los factores de ajuste correspondientes.

Si la intersección rural está sobre un camino exento de conflictos urbanos, pero sujeta ocasionalmente a fuerte demanda por un lapso de varias horas, o sea con un factor de la hora de máxima demanda igual a 1.00 que genere una acumulación continua de vehículos, la operación puede aproximarse al valor máximo de 1 500 vehículos ligeros por carril por hora de luz verde. Bajo estas condiciones, los volúmenes que se lean en la gráfica, para factores de carga cercanos a 1.0, deben multiplicarse por 1.4.

Cuando exista estacionamiento, puede emplearse la Figura 6.58 en lugar de la Figura 6.53, pero sin aplicar los factores de las tablas que aparecen en esa figura.

La capacidad o el volumen de servicio en cualquier acceso de una intersección rural se obtiene con la siguiente expresión:

$$VS = (VA_{w,rc}) (G/C) (VD) (VI) (T)$$

en la cual:

VS = Volumen de servicio en el acceso (tránsito mixto en vph).

$VA_{w,rc}$ = Volumen por hora de luz verde en el acceso, en función del ancho w y del factor de carga rc obtenido de la Figura 6.63. Cuando exista estacionamiento úsese la Figura 6.58, pero sin aplicar los factores de ajuste de las tablas que aparecen en esa figura.

G/C = Relación luz verde-ciclo.

VD = Factor de ajuste por porcentaje de vueltas derechas, obtenido de la tabla 6-V.

VI = Factor de ajuste por porcentaje de vueltas izquierdas, obtenido de la tabla 6-V o de la tabla 6-W, según el caso.

T = Factor de ajuste por vehículos pesados, obtenido de la tabla 6-X.

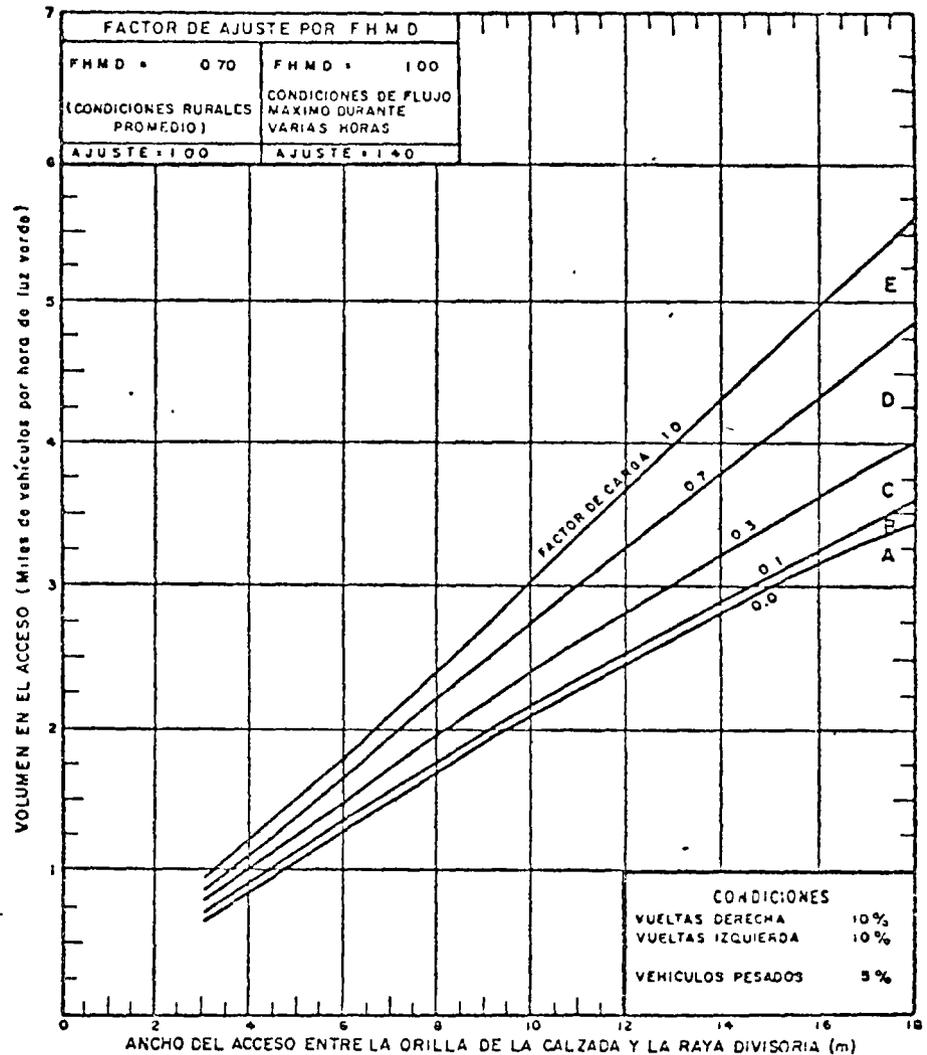


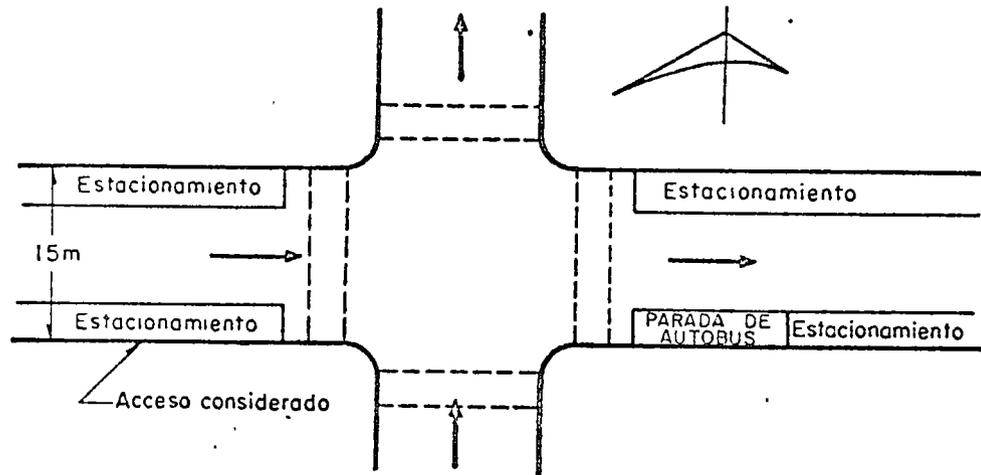
FIGURA 6.63. VOLUMEN DE SERVICIO PARA EL ACCESO A UNA INTERSECCION RURAL, EN VEHICULOS POR HORA DE LUZ VERDE PARA CAMINOS DE DOS SENTIDOS DE CIRCULACION SIN ESTACIONAMIENTO

6.11.5 Solución de ejemplos típicos

Ejemplo 1.

A. Datos:

- Intersección de 2 calles, ambas de un solo sentido de circulación.
- Ancho del acceso en estudio = 15 m, véase croquis que se incluye.
- Estacionamiento en ambos lados.
- Ubicación en la zona circundante al centro de la ciudad.
- Población del área metropolitana = 175 000 habitantes.
- Factor de la hora de máxima demanda = 0.75.
- Fases cargadas = 10/hora.
- Longitud del ciclo = 60 segundos.
- Intervalo de luz verde = 30 segundos.
- Vueltas a la derecha = cero.
- Vueltas a la izquierda = 8%.
- No existe carril ni fase especial para vuelta.
- Vehículos pesados = 7%.
- Autobuses urbanos = 10/hora, con parada después de cruzar la calle.



B. Determínese:

Para el acceso en estudio:

1. El volumen de servicio.
2. El nivel de servicio.
3. La capacidad.

C. Solución:

1. Volumen de servicio:

$$VS = (VA_{w,pc}) (G/C) (PAM, FHMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B)$$

Para determinar el valor de $VA_{w,FC}$ es necesario primero determinar al factor de carga, el cual está en función del número de fases cargadas dentro de la hora $F_C = 10/60 = 0.166$

$VA_{w,FC} = 2\ 600$ vph de luz verde (de la Figura 6.56).

$$G/C = 30/60 = 0.50$$

$PAM, FHMD = 0.87$ (de la tabla de la Figura 6.56)

$UC = 1.00$ (de la tabla de la Figura 6.56)

$VD = 1.00$ (de la tabla 6-V)

$T = 0.98$ (de la tabla 6-X)

$B = 1.00$ (de la Figura 6.62)

Substituyendo:

$$VS = 2\ 600 \times 0.50 \times 0.87 \times 1.00 \times 1.00 \times 1.00 \times 0.98 \times 1.00$$

$$VS = 1\ 108 \text{ vph}$$

2. Nivel de servicio.

De la tabla 6-U para un factor de carga de 0.166, el nivel de servicio correspondiente es C.

3. Capacidad.

En este caso, a falta de información relativa al factor de carga bajo condiciones de altos volúmenes de tránsito, supóngase un factor de carga = 0.85.

Con excepción del valor de $VA_{w,FC}$ el cual varía con el nuevo factor de carga, los demás factores permanecen invariables.

$VA_{w,FC} = 3\ 700$ vph de luz verde (de la Figura 6.56)

$$C = 3\ 700 \times 0.50 \times 0.87 \times 1.00 \times 1.00 \times 1.00 \times 0.98 \times 1.00$$

$$C = 1\ 577 \text{ vph}$$

Ejemplo 2.

A. Datos:

Intersección de 2 calles, ambas de 2 sentidos de circulación. El acceso por analizar es el correspondiente a la rama poniente de la intersección y se plantean las siguientes condiciones:

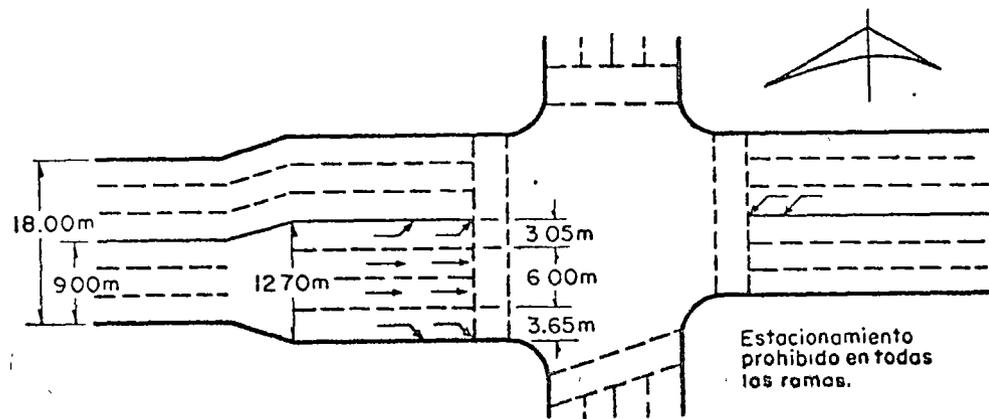
a) El acceso es ampliado para proporcionar 4 carriles de circulación, reservándose un carril para vueltas a la izquierda y un carril para vueltas a la derecha. Los anchos se muestran en el croquis que se incluye.

b) El acceso no es ampliado, conservándose únicamente 9 m de ancho. Sin estacionamiento.

Zona comercial fuera del centro de la ciudad.

Población del área metropolitana = 375 000 habitantes.

Factor de la hora de máxima demanda = 0.85



Operación del semáforo.

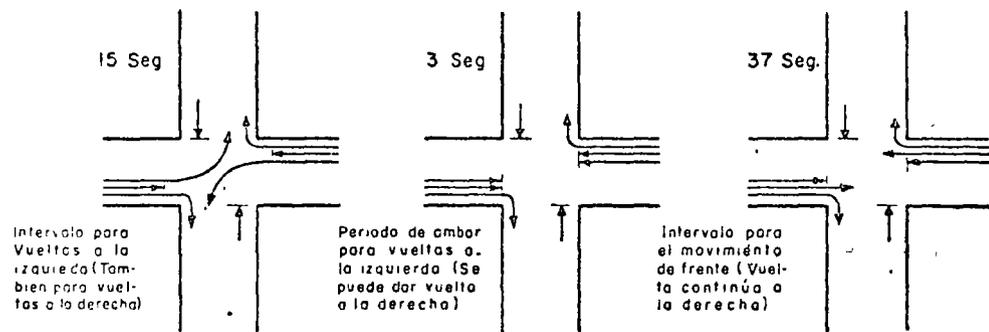
Para la condición a):

Longitud del ciclo = 90 seg.

Intervalo de luz verde para el tránsito que sigue de frente = 37 seg.

Intervalo de luz verde para vueltas a la izquierda = 15 seg. (simultáneo con las vueltas a la izquierda del sentido opuesto, pero separado de la indicación del semáforo para el tránsito de frente).

Intervalo de luz verde para vueltas a la derecha = 55 seg. (simultáneo con la luz verde para vueltas a la izquierda, luz ámbar para vueltas a la izquierda y luz verde para el tránsito de frente) = $15 + 3 + 37 = 55$ seg.



Para la condición b):

Longitud del ciclo = 90 seg.

Intervalo de luz verde, para todos los movimientos = 55 seg.

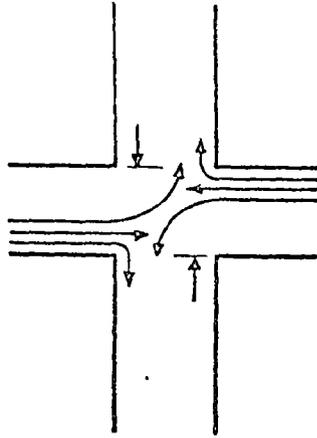
Vueltas a la derecha = 28%.

Vueltas a la izquierda = 10%.

Vehículos pesados = 3%.

Autobuses urbanos = ninguno.

Sin interferencia de peatones.



B. Determinese:

Volumen que puede alojar el acceso, al nivel de servicio D.
Para las condiciones *a*) y *b*) planteadas en los datos.

C. Solución:

1. Para la condición *a*):

En este caso, es aplicable el criterio señalado en el apartado B) del inciso 6.11.3.

Volumen de servicio en los carriles disponibles para el tránsito que sigue de frente:

$$VS_D = (VA_{w, FC} (G/C) (PAM, FHMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B))$$

$w = 6.0$ m (ancho disponible para el tránsito que sigue de frente)

$FC = 0.7$ (de la tabla 6-U, para nivel de servicio D)

$VA_{w, FC} = 1\ 600$ vph de luz verde (de la Figura 6.57)

$$G/C = 37/90 = 0.41$$

$PAM, FHMD = 1.03$ (de la tabla de la Figura 6.57)

$UC = 1.25$ (de la tabla de la Figura 6.57)

$VD = 1.05$ (de la tabla 6-V, para 0% de vueltas derechas)

$VI = 1.10$ (de la tabla 6-W, para 0% de vueltas izquierdas)

$T = 1.02$ (de la tabla 6-X)

$B =$ (No aplicable en este ejemplo)

Substituyendo:

$$VS_D = 1\ 600 \times 0.41 \times 1.03 \times 1.25 \times 1.05 \times 1.10 \times 1.02$$

$VS_D = 995$ vph (de frente)

Volumen de servicio en el carril especial para vueltas a la derecha.

Volumen por hora de luz verde. Para el nivel D, el volumen de servicio correspondiente a un carril especial para dar vuelta, es de 1 000 vph de luz verde, considerando 5% de vehículos pesados y un ancho del carril de 3.05 m. Como en este caso el ancho del carril es de 3.65 m, el volumen de servicio se verá afectado por la relación 3.65/3.05.

$$\text{Relación } G/C = 55/90 = 0.61$$

$$T = 1.02 \text{ (de la tabla 6-X)}$$

Substituyendo:

$$VS_D = 1\,000 \times \frac{3.65}{3.05} \times 0.61 \times 1.02$$

$$VS_D = 748 \text{ vph}$$

Volumen de servicio en el carril especial para vueltas a la izquierda.

Procediendo en forma semejante:

Volumen por hora de luz verde = 1 000 vph

$$\text{Relación } G/C = 15/90 = 0.166$$

$$T = 1.02$$

Substituyendo:

$$VS_D = 1\,000 \times 0.166 \times 1.02$$

$$VS_D = 170 \text{ vph}$$

Verificación de los volúmenes de servicio que proporciona el acceso en los carriles para dar vuelta y la distribución del tránsito que llega al acceso.

Vueltas a la derecha = 28%.

Vueltas a la izquierda = 10%.

Tránsito de frente = 62%

Volumen de servicio posible en todo el acceso al nivel de servicio

$$D = 995/0.62 = 1\,604 \text{ vph.}$$

Posible volumen que puede dar vuelta a la derecha = $1\,604 \times 0.28 = 449$ vph.

Como $449 \text{ vph} < 748 \text{ vph}$, la operación es satisfactoria al nivel D.

Posible volumen que puede dar vuelta a la izquierda = $1\,604 \times 0.10 = 160$ vph.

Como $160 \text{ vph} < 170 \text{ vph}$, la operación es satisfactoria al nivel D.

2. Para la condición b):

En este caso es aplicable el criterio señalado en la parte primera del apartado D) del inciso 6.11.3

$$VSD = (VA_{w, FC}) (G/C) (PAM, FIIMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B)$$

$w = 9.00$ m (ancho sin considerar la ampliación)

$FC = 0.7$ (de la tabla 6-U, para nivel de servicio D)

$VA_{w, FC} = 2\,420$ vph de luz verde (de la Fig. 6.57)

$$G/C = 55/90 = 0.61$$

Los factores de ajuste son los mismos que para la solución *a*) del ejemplo, excepto que en este caso:

$VD = 0.995$ (de la tabla 6-V; para 28% de vueltas derechas)

$VI = 1.00$ (de la tabla 6-W; para 10% de vueltas izquierdas)

Substituyendo:

$$VSD = 2\,420 \times 0.61 \times 1.03 \times 1.25 \times 0.995 \times 1.00 \times 1.02$$

$$VSD = 1\,930 \text{ vph}$$

Conclusión:.

Los resultados indican que para el nivel de servicio D, los volúmenes de servicio son:

Para la condición *a*): 1 604 vph con ampliación del acceso y proporcionando carriles especiales para vueltas a la derecha y a la izquierda con indicaciones especiales de luz verde del semáforo.

Para la condición *b*): 1 930 vph sin ampliación y con una sola indicación de luz verde del semáforo.

Lo anterior demuestra claramente que la adición de carriles especiales para vueltas y la operación con fases múltiples del semáforo, no significa que automáticamente se logre un incremento en los volúmenes de servicio.

Las razones que justifican los resultados anteriores, son las siguientes:

1. La utilización de los carriles disponibles es proporcional a la distribución de la demanda: 28% en el carril derecho, 31% en cada uno de los dos carriles centrales y 10% en el carril izquierdo. Esto trae como consecuencia, el uso desbalanceado del ancho del acceso disponible.

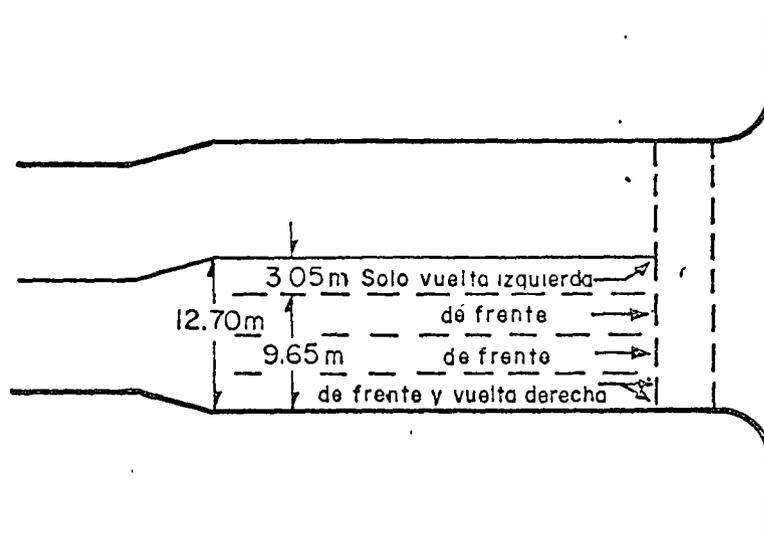
2. Se ha sustraído una parte considerable al tiempo de luz verde del tránsito que sigue de frente, para proporcionar el tiempo necesario para la fase del tránsito que da vuelta a la izquierda; sin embargo, la pérdida de capacidad en los carriles centrales es considerablemente mayor que lo que se gana en el carril para vuelta a la izquierda.

3. El carril para vueltas a la izquierda es usado principalmente para almacenamiento en lugar de utilizarse para desalojar el tránsito.

4. El carril para vueltas a la derecha tiene mucho más capacidad que la requerida para satisfacer la demanda de ese movimiento.

En este caso particular es posible, aparentemente, incrementar el volumen de servicio si el carril especial para vueltas a la derecha es utilizado también por los vehículos que siguen de frente, aun cuando tengan que ser eliminadas las vueltas a la derecha durante la indicación de luz verde para vueltas a la izquierda.

En estas condiciones, la operación sería la siguiente:



Volúmenes de servicio al nivel D.

En el carril especial para vueltas a la izquierda, el volumen de servicio es el mismo que para la parte 1 del ejemplo.

Para el resto de los carriles:

$$VS_D = (VA_{w, FC}) (G/C) (PAM, FHMD) (UC) (VC) (VI) (T) (B)$$

$$w = 9.65 \text{ m}$$

$$FC = 0.7 \text{ (de la tabla 6-U para nivel de servicio)}$$

$$VA_{w, FC} = 2600 \text{ vph de luz verde (de la Figura 6.57)}$$

$$G/C = 37/90 = 0.41$$

$$PAM, FHMD = 1.03 \text{ (de la tabla de la Figura 6.57)}$$

$$UC = 1.25 \text{ (de la tabla de la Figura 6.57)}$$

$$VD = 0.995 \text{ (de la tabla 6-V; para 28\%)}$$

$$VI = 1.10 \text{ (de la tabla 6-W; para 0\%)}$$

$$T = 1.02 \text{ (de la tabla 6-X)}$$

Substituyendo:

$$VS_D = 2600 \times 0.41 \times 1.03 \times 1.25 \times 0.995 \times 1.10 \times 1.02$$

$$VS_D = 1530 \text{ vph}$$

Volumen de demanda total con base en el porcentaje del tránsito que va de frente y del que da vuelta a la derecha = $1530/0.90 = 1700$ vph.

Vueltas potenciales a la izquierda, suponiendo que el tránsito de frente y el tránsito a la derecha son los que controlan, $1700 \times 0.10 = 170$ vph.

Comparando con el volumen de servicio, $170 = 170$; por lo anterior la operación es satisfactoria, aunque en el límite. Se deduce, por lo tanto, que el acceso podría alojar un volumen de demanda de $1530 + 170 = 1700$ vph.

6.12 ANALISIS DE CAPACIDAD Y VOLUMENES DE SERVICIO EN ARTERIAS URBANAS Y SUBURBANAS

Para propósitos de análisis, las arterias urbanas y suburbanas se consideran como avenidas localizadas fuera de la zona comercial del centro de la ciudad, las cuales se caracterizan bien sea por la existencia de intersecciones controladas con semáforo a una distancia promedio de 1500 m o menos, o bien, porque las velocidades límites son de 60 km/h o menores, como consecuencia del desarrollo urbano adyacente.

La capacidad de las arterias urbanas depende principalmente de la capacidad de las intersecciones a nivel que se encuentran a lo largo de la arteria, analizadas en forma aislada. Sin embargo, cuando se desea conocer el nivel de servicio que puede suministrar la arteria, es necesario hacer el análisis considerándola en toda su longitud.

6.12.1 Nivel de servicio

Primeramente debe investigarse el efecto que tienen las interrupciones y las intersecciones sobre la operación del tránsito, debiendo analizarse después la arteria en toda su longitud, para determinar un valor promedio de la relación volumen-capacidad (relación v/c). Esto permitirá conocer la naturaleza verdadera de las condiciones operacionales que encuentran los conductores.

La velocidad usada en el análisis es la velocidad global, debido a que la velocidad de operación es difícil de definir donde existe una variedad de interrupciones.

Las velocidades globales están en función de factores tales como: límites de velocidad, número de intersecciones y conflictos a la mitad de la cuadra y en las intersecciones; el efecto de estas interrupciones es mayor a medida que aumentan los volúmenes de tránsito. La calidad del alineamiento, por otra parte, tiene un efecto relativamente pequeño sobre la velocidad, excepto en lugares especiales como es el caso de pasos a desnivel.

La relación que existe entre la velocidad global y la relación v/c , se emplea en este caso, para analizar el nivel de servicio en forma similar a como se hizo para las carreteras. La Figura 6.64 muestra esta relación para arterias urbanas y suburbanas.

La curva I representa condiciones de circulación continua en arterias suburbanas sin control de semáforos, en las que el límite máximo de la velocidad es de 60 km/h o en arterias urbanas controladas con semáforos, en las que existe una progresión razonablemente buena de los semáforos.

La curva II representa condiciones de circulación discontinua. Los semáforos están espaciados normalmente a distancia de 800 m o menos, sin que exista interconexión entre ellos. La velocidad bajo condiciones de

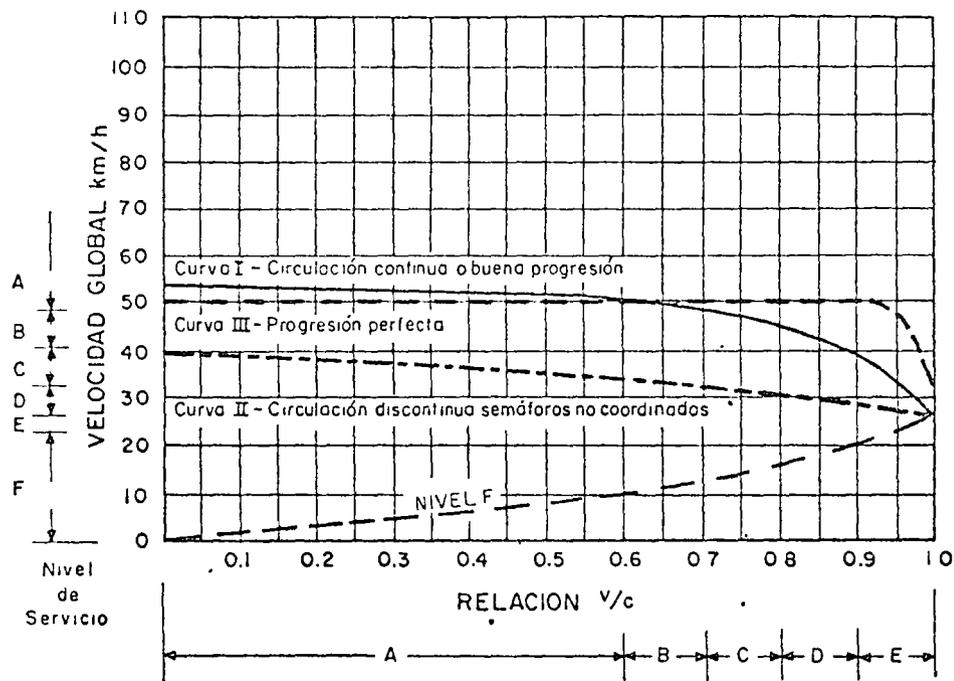


FIGURA 6.64. RELACIONES ENTRE LA VELOCIDAD GLOBAL Y LA RELACION V/C EN ARTERIAS URBANAS Y SUBURBANAS

circulación continua, está representada por la velocidad que se alcanza a la mitad de la cuadra, la cual está gobernada muchas veces por el límite máximo de la velocidad (40 km/h para el ejemplo ilustrado con la curva II).

La curva III representa una progresión perfecta con grupos de vehículos circulando a la velocidad de la progresión, la cual para el ejemplo es igual a 50 km/h.

Para la condición de circulación continua, que raras veces se presenta, la capacidad es idéntica en concepto y a menudo en valor absoluto, a las capacidades de caminos con circulación continua, discutidas en los incisos 6.5 a 6.8. Para condiciones de circulación discontinuas, la capacidad usualmente está gobernada por los dispositivos para controlar el tránsito y por las condiciones físicas de las intersecciones.

La capacidad aquí, representa fundamentalmente la máxima utilización de la arteria en aquellos intervalos de la hora en que hay indicación de luz verde, o bien, cuando la arteria está libre de otras interrupciones predecibles. Una avenida puede llegar a alojar volúmenes de tránsito cercanos a los que se encuentran bajo condiciones de circulación continua, cuando el tránsito está moviéndose con la indicación de la luz verde del semáforo; sin embargo, como el tránsito deja de circular porque el semáforo está con la indicación de luz roja, o bien, cuando el espaciamiento entre grupos de vehículos es muy grande en los casos de sistemas progresivos, la capa-

idad en vehículos por hora es mucho menor que bajo las condiciones de circulación continua.

Cuando en un tramo de arteria urbana, con características geométricas más o menos uniformes, haya varias intersecciones controladas con semáforo y no existan diferencias radicales en la programación de ellos, es posible obtener condiciones promedio del nivel de servicio aplicables a todo el tramo (excepto para el nivel E). Sin embargo, cuando se consideran condiciones de volumen máximo (nivel E, o capacidad), no debe excederse la capacidad del punto más crítico.

La capacidad en los accesos de las intersecciones se determina con los procedimientos descritos en el inciso 6.11.

Los niveles de servicio en arterias urbanas pueden analizarse de manera semejante a la de los otros caminos, usando como criterio en este caso, la velocidad global y la relación v/c . Lo anterior implica que se analicen los niveles de operación de todos los puntos potenciales de restricción, y de un análisis del tramo en su conjunto.

Aun cuando los puntos críticos son normalmente los accesos a las intersecciones, éstos pueden presentarse también en lugares a mitad de la cuadra.

En la tabla 6-Y se muestran los niveles de servicio, relacionados en forma aproximada con el factor de carga y con el factor de la hora de máxima demanda; sin embargo, debe hacerse notar que teóricamente el factor de la hora de máxima demanda puede ocurrir a cualquier nivel de servicio, ya que éste depende más bien del grado de demanda que de su magnitud. En la tabla se muestra, además de la calidad del flujo y de los límites de las velocidades globales, la escala de valores de la relación v/c para cada uno de los niveles.

6.12.2 Elementos críticos que requieren consideración

A) Progresión del sistema de semáforos. Una progresión perfecta o casi perfecta de semáforos puede lograrse a altos volúmenes de tránsito, sólo si pueden establecerse las siguientes condiciones: 1) que existan pocos movimientos de vuelta, 2) que pueda sostenerse la demanda por ciclo, y 3) que no se presenten conflictos a mitad de la cuadra. En el caso de una progresión perfecta ningún vehículo se ve detenido por las indicaciones de la luz roja de los semáforos, por lo que se logra en la circulación, volúmenes de tránsito cercanos a los 2 000 vehículos por hora de luz verde.

La operación bajo condiciones de volúmenes altos es siempre inestable, pudiendo perderse el balance en el momento en que se produzca cualquier anomalía en la circulación del tránsito. Para cálculos de capacidad de intersecciones, bajo estas condiciones, es apropiado el uso de un factor de carga de 0.95 y de un factor de la hora de máxima demanda, también de 0.95. El factor de carga de 0.95 tiene un significado especial, indicando que casi todos los ciclos fueron totalmente utilizados. Por otra parte y refiriéndose a la curva III de la Figura 6.64, se puede apreciar que en una progresión perfecta se tiene una velocidad constante, mientras que la relación v/c varía desde cero hasta alcanzar un valor cercano a 0.95 para esa misma velocidad, lo cual indica que bajo estas condiciones los conductores no tienen objeción a que el volumen de tránsito se vaya incrementando, puesto que pueden mantener la velocidad correspondiente a la progresión perfecta. Para efectos de análisis, el valor máximo de v/c para el nivel de servicio A, en una progresión casi perfecta es de 0.80.

NIVEL DE SERVICIO	CONDICIONES DEL FLUJO DE TRANSITO				VOLUMEN DE SERVICIO- CAPACIDAD ^{a, b}
	DESCRIPCION	VELOCIDAD GLOBAL ^a (km/hora)	FACTOR DE CARGA ^a	FACTOR DE LA HORA DE MAXIMA DEMANDA ^b	(v/c)
A	FLUJO LIBRE	VI 50	0 0	≤ 0.70	≤ 0.60 (0.80)
B	FLUJO ESTABLE	VI 40	≤ 1 1	≤ 0.80	≤ 0.70 (0.85)
C	FLUJO ESTABLE	VI 30	≤ 1 3	≤ 0.85	≤ 0.80 (0.90)
D	APROXIMANDOSE AL FLUJO INESTABLE	VI 20	≤ 1 7	≤ 0.90	≤ 0.90 (0.95)
E ^d	FLUJO INESTABLE	20	≤ 1 0 (0.85) ^c	≤ 0.95	≤ 1.00
F	FLUJO FORZADO	< 20	No Significativo	No Significativo	No Significativo ^e

- a - La velocidad global y la relación v/c son medidas independientes del nivel de servicio; deben satisfacerse ambos límites en cualquier determinación de niveles de servicio, con la debida consideración al hecho de que estas son racionalizaciones en su mayor parte. El factor de carga que es una medida de nivel de servicio en intersecciones, puede usarse como criterio suplementario cuando sea necesario.
- b - Los valores entre parentesis se refieren a una progresión casi perfecta.
- c - Un factor de carga de 1.00 no se encuentra con frecuencia, aún bajo condiciones de operación a la capacidad, debido a las fluctuaciones inherentes al flujo de tránsito.
- d - Capacidad.
- e - La relación volumen de demanda-capacidad puede exceder 1.00, indicando sobrecarga.

TABLA 6-Y. NIVELES DE SERVICIO PARA CALLES URBANAS Y SUBURBANAS

B) Operación en un sentido y en dos sentidos. Para propósitos de comparación, es necesario que se analicen las siguientes condiciones: 1) la demanda y composición del tránsito, 2) la superficie de rodamiento, 3) el estacionamiento, 4) el señalamiento, 5) el medio ambiente, y 6) los movimientos de vuelta en todo el tramo.

En general, la operación de arterias de un sentido es más eficiente que la operación de arterias de dos sentidos con igual anchura, en términos de vehículos por hora.

C) Otras interrupciones e interferencias. A lo largo de las arterias urbanas y suburbanas existen otros elementos que afectan la circulación del tránsito; entre los más comunes están los siguientes:

- 1) Intersecciones sin control de semáforos.
- 2) Entradas y salidas en la mitad de la cuadra y movimientos de vuelta correspondientes.
- 3) Estacionamientos a mitad de la cuadra.
- 4) Lotes de estacionamiento a mitad de la cuadra.
- 5) Señales y marcas inadecuadas en el pavimento.
- 6) Falta de canalización.
- 7) Restricción en las distancias libres laterales.
- 8) Interferencias de peatones.
- 9) Maniobras de los autobuses.
- 10) Falta de aplicación del reglamento de tránsito.

Hay que señalar que hasta el momento, no existen suficientes datos que sirvan de base para determinar los factores de ajuste o de corrección para cada uno de estos elementos.

6.12.3 Procedimiento para determinar la capacidad y los niveles de servicio

A) Cálculo de la capacidad. El procedimiento para el cálculo de la capacidad es el siguiente:

1. Hágase una revisión general del tramo en estudio, estableciendo los elementos que influyan en la capacidad, tales como: intersecciones controladas con semáforo, restricciones a mitad de la cuadra ocasionadas por las interferencias del tránsito y por las condiciones geométricas y, finalmente, los subtramos entre intersecciones con longitudes mayores de 1 500 m en los que exista circulación más o menos continua.

2. Calcúlense en las intersecciones, las capacidades de los accesos más importantes con los procedimientos que se dan en el inciso 6.11 y de los subtramos con circulación continua, con los procedimientos descritos en los incisos 6.6 a 6.8. Analícese cada restricción importante a la mitad de la cuadra, como un caso especial, para lo cual pueden adoptarse los procedimientos básicos para la determinación de la capacidad de intersecciones, dados en el inciso 6.11.

3. Interpretense los resultados del análisis anterior, para establecer: a) los puntos con capacidades menores que la de la arteria en su conjunto, b) una capacidad de control, tomando como base la capacidad mínima en el tramo (excluyendo puntos de congestionamiento).

4. Hágase un esfuerzo por incrementar la capacidad de los puntos de congestionamiento, al valor mínimo establecido como capacidad de control para el resto del tramo. Si lo anterior no es posible, estos puntos serán los que gobiernan la capacidad.

B) Cálculo del nivel de servicio. El procedimiento para el cálculo del nivel de servicio es el siguiente:

1. Hágase una revisión general de la arteria, para determinar aquellos puntos en que las características del tránsito cambien notablemente, debido a movimientos de vuelta en las calles transversales, enlaces y otras entradas y salidas. Para propósitos de análisis, estos puntos deberán establecerse como límites dentro del tramo.

2. Calcúlese la capacidad de todas las intersecciones y de otros elementos con alguna posibilidad de influir en la operación de la arteria, de manera similar a como se indica en el apartado A) (cálculo de la capacidad); sepárense aquellos puntos de restricción anormales y establézcase un valor mínimo de control de la capacidad para el resto del tramo.

3. Determínese si el volumen de demanda general excede o no al valor mínimo de la capacidad, establecido como control en el tramo. Cuando esta capacidad no sea excedida, háganse verificaciones adicionales para determinar si alguno de los puntos de restricción anormales, separados para su análisis individual, suministran capacidades por abajo del volumen de demanda.

4. Si de acuerdo con el punto anterior, no se producen limitaciones en la capacidad, divídase el volumen de demanda entre la capacidad establecida como control, para obtener la relación v/c promedio para el tramo. Obténgase la velocidad global, de la Figura 6.64 y determínese el nivel de servicio general, de la tabla 6-Y.

Cuando haya restricciones anormales, pero éstas no limiten la capacidad, considérense en detalle para establecer los niveles de servicio correspondientes. Esto se hace a menudo con los procedimientos del inciso 6.11 cuando se trata de intersecciones, o haciendo adaptaciones en el caso de otras interrupciones; aunque a veces, pueden ser más apropiados los procedimientos para caminos con circulación continua. Interpretéense los niveles de servicio en cada punto, en términos del número de restricciones aceptado en relación con la capacidad de control obtenida para el resto del tramo. Establézcase por último, el nivel de servicio para todo el tramo, ponderando de acuerdo con las distancias de influencia de las restricciones.

5. Si de acuerdo con el punto 3, se produce una limitación en la capacidad, efectúese un análisis más detallado de ese punto de restricción, para determinar la extensión de su influencia, es decir, determínese si el efecto es solamente local, debido a movimientos de vuelta ocurriendo antes o después del punto, o bien, si se están creando condiciones de flujo forzado en la corriente antes de llegar al punto, en tanto que después de éste se tiene un nivel tolerable. Asígnese el nivel de servicio general, tomando en consideración lo anterior.

De manera inversa, para determinar en forma aproximada el volumen de servicio que puede suministrar una arteria dado el nivel de servicio, o la velocidad global deseada, deberá entrarse a la Figura 6.64 y obtener la relación v/c . Aplíquese esta relación a la capacidad de control del tramo, determinada según lo indicado con anterioridad, para obtener el volumen de servicio o de demanda que puede alojar la arteria a este nivel.

6.12.4 Solución de ejemplos típicos

Ejemplo 1.

A. Datos:

Tramo de una arteria urbana, con intersecciones controladas con semáforo.

Los anchos de las calles se muestran en el croquis.

Banqueta de 1.50 m.

Sin estacionamientos.

3% de camiones.

30 autobuses urbanos/hora; con parada de autobuses como se muestra en el croquis.

Localizada en la zona comercial fuera del centro.

Población = 500 000 habitantes.

Factor de la hora de máxima demanda = 0.85.

Interferencia de peatones: despreciable.

Características de las intersecciones y movimientos de vuelta (ver croquis).

Los tiempos de recorrido indican una velocidad global de 30 km/h.

Los volúmenes de demanda que se muestran en el croquis, sólo indican el flujo en un sentido.

B. Determinese:

1. El nivel de servicio general correspondiente a la velocidad global de 30 km/h.

2. El nivel de servicio por restricciones en las intersecciones y a mitad de la cuadra.

C. Solución:

1. De la tabla 6-Y, para una velocidad global de 30 km/h, el nivel de servicio es C, en el límite con el nivel de servicio D.

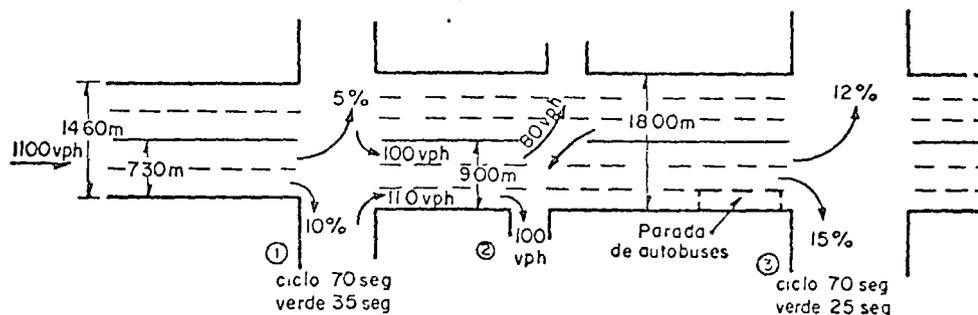
2. En el croquis se observa que la intersección 1, el área a la entrada del lote de estacionamiento 2 y la intersección 3, son los elementos principales de control de la capacidad.

Nivel de servicio en la intersección 1:

Para el análisis son aplicables los procedimientos del inciso 6.11.

Para el cálculo de nivel de servicio es necesario determinar primero, el volumen por hora de luz verde.

$$VA_{w, FC} = \frac{VS \text{ (volumen de demanda)}}{(G/C) (PAM, FIIMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B)}$$



Para propósitos prácticos, los vehículos esperando para entrar al estacionamiento, bloquean continuamente el carril de la derecha y el de la izquierda. El carril del centro es bloqueado por los vehículos en sentido opuesto que entran al estacionamiento, durante el 30% de la hora.

$$VS = 1\ 100 \text{ vph (demanda en el acceso)}$$

$$G/C = 35/70 = 0.50$$

$$PAM, FHMD = 1.06 \text{ (de la tabla de la Figura 6.57)}$$

$$UC = 1.25 \text{ (de la tabla de la Figura 6.57)}$$

$$VD = 1.00 \text{ (de la tabla 6-V)}$$

$$VI = 1.05 \text{ (de la tabla 6-W)}$$

Debido a que no existe parada de autobuses, los autobuses urbanos pueden considerarse como vehículos pesados, y sumarse al por ciento de vehículos dado como dato en el ejemplo.

$$\text{Autobuses} = \frac{30}{1\ 100} = 2.7\% \doteq 3\%, \text{ por lo que:}$$

Total de vehículos pesados = 3% + 3% = 6%; el factor de ajuste correspondiente es:

$$T = 0.99 \text{ (de la tabla 6-X)}$$

Substituyendo:

$$VA_{w, FC} = \frac{1\ 100}{0.50 \times 1.06 \times 1.25 \times 1.00 \times 1.05 \times 0.99}$$

$$VA_{w, FC} = 1\ 597 \text{ vph de luz verde.}$$

Entrando a la gráfica de la Figura 6.57 con el volumen por hora de luz verde antes calculado y con el ancho del acceso en metros, se obtiene un factor de carga $FC = 0.15$, el cual corresponde a un nivel de servicio C.

De la misma Figura 6.57 se obtiene que el volumen por hora de luz verde al nivel de servicio E (capacidad) es de 2 100 vph, por lo que:

$$\frac{v}{c} = \frac{1\ 597}{2\ 100} = 0.76$$

De la tabla 6-Y, se concluye que la operación corresponde a un nivel de servicio C.

Nivel de servicio en el área a la entrada del lote de estacionamiento 2.

Debido a que los movimientos de vuelta izquierda para entrar al lote de estacionamiento, obstruyen al tránsito que va de paso, la circulación se ve sujeta a continuas paradas, tal como sucede en una intersección controlada con semáforo.

Supóngase, por lo tanto, que se trata de una intersección controlada con semáforo, sin movimientos de vuelta, ancho del acceso de 3.00 m, sin estacionamiento y 70% de luz verde (100-30).

$$VA_{w, FC} = \frac{VS \text{ (volumen de demanda)}}{(G/C) (PAM, FHMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B)}$$

$$VS = 1\ 100 - 1\ 100 (0.10 + 0.05) + 100 + 110$$

$$VS = 1\ 145 \text{ vph}$$

$G/C = 0.70$ (se considera que el tránsito sólo sufre interrupciones durante 30% del tiempo).

$PAM, FHMD = 1.06$ (de la tabla de la Figura 6.57)

$UC = 1.25$ (de la tabla de la Figura 6.57)

$VD = 1.20$ (de la tabla 6-V)

$VI = 1.30$ (de la tabla 6-W)

$T = 0.99$ (de la tabla 6-X)

Substituyendo:

$$VA_{w, FC} = \frac{1\ 145}{0.70 \times 1.06 \times 1.25 \times 1.20 \times 1.30 \times 0.99} = 800 \text{ vph de luz verde}$$

Entrando a la gráfica de la Figura 6.57 con el volumen por hora de luz verde antes calculado y con el ancho del acceso en metros, se obtiene un factor de carga de 0.9, el cual corresponde a un nivel de servicio E y por consiguiente, el área a la entrada del lote de estacionamiento operará a la capacidad.

Nivel de servicio en la intersección 3:

$$VA_{w, FC} = \frac{VS \text{ (volumen de demanda)}}{(G/C) (PAM, FHMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B)}$$

$$VS = 1\ 145 - 100 - 80 = 965 \text{ vph}$$

$$G/C = 25/70 = 0.36$$

$PAM, FHMD = 1.06$ (de la tabla de la Figura 6.57)

$UC = 1.25$ (de la tabla de la Figura 6.57)

$VD = 0.99$ (de la tabla 6-V)

$VI = 0.98$ (de la tabla 6-W)

$T = 1.02$ (de la tabla 6-X para 3% de vehículos pesados)

$B = 0.91$ (de la Figura 6.59)

Substituyendo:

$$VA_{w, FC} = \frac{965}{0.36 \times 1.06 \times 1.25 \times 0.99 \times 0.98 \times 1.02 \times 0.91}$$

$$VA_{w, FC} = 2\ 246 \text{ vph de luz verde}$$

Entrando a la gráfica de la Figura 6.57 con el volumen por hora de luz verde antes calculado y con el ancho del acceso en metros, se obtiene un factor de carga de 0.5, el cual corresponde a un nivel de servicio D.

De la misma Figura 6.57 se obtiene que el volumen por hora de luz verde a la capacidad es de 2 700 vph, por lo que:

$$\frac{v}{c} = \frac{2\,246}{2\,700} = 0.83$$

Examinando la tabla 6-Y, se concluye que la operación corresponde a un nivel de servicio D.

Conclusión:

La arteria en su conjunto tiene una operación cercana al nivel de servicio D, en tanto que las intersecciones 1 y 3 operan niveles de servicio C y D, respectivamente. Sin embargo, el área en la entrada de los estacionamientos a la mitad de la cuadra es un punto serio de interferencia, siendo esta área la que controla la capacidad en esta parte de la arteria.

6.13 ANALISIS DE CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO EN LAS CALLES DE LA ZONA COMERCIAL DEL CENTRO DE LA CIUDAD

En la zona comercial del centro de la ciudad, existen muchas calles importantes cuya función principal es dar servicio al tránsito generado por los negocios locales. En este caso, dar servicio eficiente al tránsito de paso viene a ser de importancia secundaria, aunque en ocasiones algunas calles del centro que se encuentran estratégicamente localizadas, pueden operar durante las horas de máxima demanda en forma similar a como lo hacen las arterias. Normalmente, el flujo de tránsito es más bien de movimientos circulatorios internos que de movimientos directos a través del centro; existen, además, gran cantidad de conflictos entre los volúmenes usualmente fuertes de peatones y el gran número de vehículos que dan vuelta.

Todavía no es posible desarrollar gráficas o curvas que representen las relaciones básicas velocidad-volumen, en tramos largos de calles del centro de la ciudad formados por varias cuadras. Con el conocimiento limitado que se tiene de las relaciones complejas que gobiernan al flujo de tránsito en el centro de la ciudad, ni siquiera ha sido posible obtener relaciones típicas v/c . Las capacidades de las calles del centro aparentemente similares, pueden variar bastante debido a las diferencias en las condiciones ambientales.

Las operaciones del tránsito en el centro de la ciudad, pueden caer en un nivel de servicio F, si se comparan con la escala de niveles de servicio de las arterias urbanas de primer orden, descritas en el inciso 6.12.

La operación en tramos largos de calles del centro de la ciudad, no debe relacionarse con las escalas de niveles de operación de otras calles urbanas.

Para el análisis de las calles del centro de la ciudad, en la actualidad no es posible proporcionar procedimientos para determinar el nivel de

servicio con base en el volumen de demanda. Sin embargo, se sugiere una escala de niveles de servicio para diferentes flujos del tránsito, en la calle en estudio. Esta escala se muestra en la tabla 6-Z, la cual representa el grado de aceptación del conductor, a varios niveles de operación; la tabla está basada enteramente, en las velocidades globales, no habiéndose hecho el intento de relacionarlas con los volúmenes de tránsito, debido al gran número de factores que intervendrían.

Se recomienda, para fines de determinación de la capacidad y del volumen de servicio, hacer el análisis intersección por intersección, por medio de los procedimientos descritos en el inciso 6.11 correspondiente a intersecciones controladas con semáforo. Conociendo los tiempos de recorrido y por consiguiente las velocidades globales a lo largo del tramo, de la tabla 6-Z puede obtenerse un nivel de servicio general, relacionado con el rango de niveles que se encuentran normalmente en la zona comercial del centro de la ciudad.

NIVEL DE SERVICIO	CONDICIONES DEL FLUJO DE TRÁNSITO	
	DESCRIPCIÓN	VELOCIDAD GLOBAL (km/h)
A	Flujo libre	≥ 40
B	Flujo estable	≥ 30
C	Flujo estable	≥ 25
D	Aproximándose al flujo inestable	≥ 15
E ^a	Flujo inestable	Menor que 15
F	Flujo forzado	Paradas frecuentes

a) El nivel E para la calle en su conjunto, no puede considerarse como capacidad; la capacidad está gobernada por la de las intersecciones críticas o por la de otras interrupciones

TABLA 6-Z. NIVELES DE SERVICIO PARA CALLES DEL CENTRO DE LA CIUDAD

6.13.1 Solución de ejemplos típicos

Ejemplo 1.

A. Datos:

Tramo de calle con dos sentidos de circulación, localizado en la zona comercial del centro de la ciudad, en el que existen 4 intersecciones controladas con semáforo.

Los volúmenes de demanda y las características de operación en las intersecciones, se muestran en el croquis.

Estacionamiento en ambos lados.

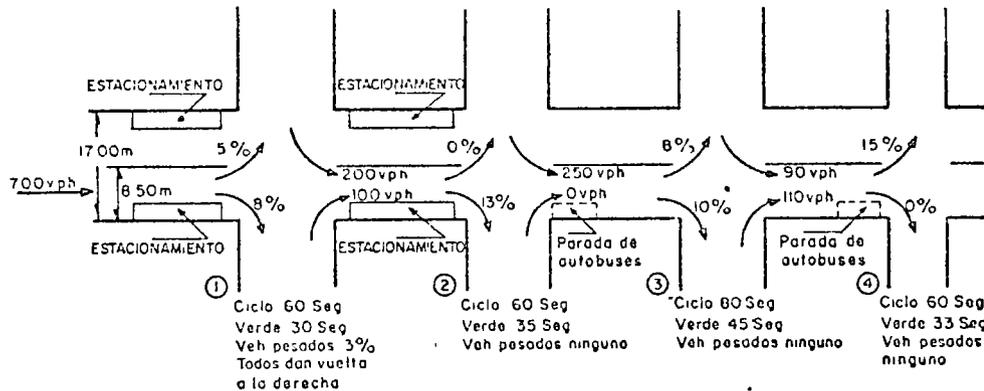
Ancho de la calle = 17.00 m de guarnición a guarnición.

Población del área metropolitana = 175 000 habitantes.

Factor de la hora de máxima demanda = 0.85.

Autobuses urbanos = 40/hora.

Vehículos pesados (ver croquis).



B. Determine:

1. El nivel de servicio que proporciona el tramo de calle, si los recorridos indican una velocidad global de 23 km/h.
2. El volumen de servicio en los accesos a las intersecciones, para el nivel de servicio obtenido en el punto anterior.
3. La intersección que controla la operación, de acuerdo con los volúmenes de demanda indicados.

C. Solución:

1. De la tabla 6-Z, para una velocidad global de 23 km/h, el nivel de servicio es D.
2. Volumen de servicio al nivel de servicio D.

Intersección 1:

$$VS_D = (VA_{w, FC}) (G/C) (PAM, FIIMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B)$$

$$w = 8.50 \text{ m}$$

$$FC = 0.7 \text{ (de la tabla 6-U, para nivel de servicio D)}$$

$$VA_{w, FC} = 1550 \text{ vph de luz verde (de la Figura 6.58)}$$

$$G/C = 30/60 = 0.50$$

$$PAM, FIIMD = 0.97 \text{ (de la tabla de la Figura 6.58)}$$

$$UC = 1.00 \text{ (de la tabla de la Figura 6.58)}$$

Como todos los vehículos pesados dan vuelta a la derecha, son necesarias ciertas consideraciones especiales: Si $\frac{3}{8}$ de las vueltas son vehículos

pesados y $\frac{5}{8}$ son vehículos ligeros y se considera que dos vehículos ligeros equivalen a un pesado, se tiene:

$\frac{5}{8} \times 1 + \frac{3}{8} \times 2 = 1\frac{1}{8}$; es decir, 11% de vehículos equivalentes dan vuelta a la derecha, por lo que:

$$VD = 0.995 \text{ (de la tabla 6-V)}$$

$$VI = 1.05 \text{ (de la tabla 6-W.)}$$

Como no hay parada de autobuses, considérense a los 40 autobuses urbanos por hora como un porcentaje respecto al volumen de servicio, calculado con los factores de ajuste obtenidos anteriormente, es decir:

$$VS = 1\,550 \times 0.50 \times 0.97 \times 1.00 \times 0.995 \times 1.05 = 785 \text{ vph}$$

$$40/785 = 5.1 \approx 5\%$$

% total de vehículos pesados = 3% (vehículos pesados que dan vuelta a la derecha) + 5% (autobuses urbanos considerados como camiones) = 8%.

El factor de ajuste será por consiguiente:

$$T = 0.97 \text{ (de la tabla 6-X)}$$

Substituyendo:

$$VS_D = 785 \times 0.97 = 761 \text{ vph}$$

Intersección 2:

$$VS_D = (VA_{w, FC}) (G/C) (PAM, FHMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B)$$

$$w = 8.50 \text{ m}$$

$$FC = 0.7 \text{ (de la tabla 6-U, para nivel de servicio D)}$$

$$VA_{w, FC} = 1\,550 \text{ vph de luz verde (de la Figura 6.58)}$$

$$G/C = 35/60 = 0.58$$

$$PAM, FHMD = 0.97 \text{ (de la tabla de la Figura 6.58)}$$

$$UC = 1.00 \text{ (de la tabla de la Figura 6.58)}$$

$$VD = 0.985 \text{ (de la tabla 6-V)}$$

$$VI = 1.10 \text{ (de la tabla 6-W)}$$

$$T = 1.05 \text{ (de la tabla 6-X, para 0% de camiones)}$$

$$B = 1.00 \text{ (de la Figura 6.62)}$$

Substituyendo:

$$VS_D = 1\,550 \times 0.58 \times 0.97 \times 1.00 \times 0.985 \times 1.10 \times 1.05 \times 1.00$$

$$VS_D = 992 \text{ vph}$$

Intersección 3:

$$VS_D = (VA_{w, FC}) (G/C) (PAM, FHMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B)$$

$$w = 8.50 \text{ m}$$

$$FC = 0.7 \text{ (de la tabla 6-U, para nivel de servicio D)}$$

$$VA_{w, FC} = 2\,250 \text{ vph de luz verde (de la Figura 6.57)}$$

$$G/C = 45/80 = 0.56$$

$$PAM, FHMD = 0.97 \text{ (de la tabla de la Figura 6.57)}$$

$$UC = 1.00 \text{ (de la tabla de la Figura 6.57)}$$

$$VD = 1.00 \text{ (de la tabla 6-V)}$$

$$VI = 1.02 \text{ (de la tabla 6-W)}$$

Siguiendo el mismo criterio que para el análisis de la intersección 1, es decir, considerando a los 40 autobuses urbanos por hora como un porcentaje del volumen de servicio calculado con los factores anteriores, se obtiene el 3% de vehículos pesados, por lo que el factor de ajuste será:

$$T = 1.02 \text{ (de la tabla 6-X)}$$

Substituyendo:

$$VS_D = 2\,250 \times 0.56 \times 0.97 \times 1.00 \times 1.00 \times 1.02 \times 1.02$$

$$VS_D = 1\,272 \text{ vph}$$

Intersección 4:

$$VS_D = (VA_{w, FC}) (G/C) (PAM, FHMD) (UC) (VD) (VI) (T) (B)$$

$$w = 8.50 \text{ m}$$

$$FC = 0.7 \text{ (de la tabla 6-U, para nivel de servicio D)}$$

$$VA_{w, FC} = 2\,250 \text{ vph de luz verde (de la Figura 6.57)}$$

$$G/C = 33/60 = 0.55$$

$$PAM, FHMD = 0.97 \text{ (de la tabla de la Figura 6.57)}$$

$$UC = 1.00 \text{ (de la tabla de la Figura 6.57)}$$

$$VD = 1.025 \text{ (de la tabla 6-V)}$$

VI = 0.95 (de la tabla 6-W)

T' = 1.05 (de la tabla 6-X, para 0% de camiones)

B = 0.82 (de la Fig. 6.59)

Substituyendo:

$$VS_D = 2\,250 \times 0.55 \times 0.97 \times 1.00 \times 1.025 \times 0.95 \times 1.05 \times 0.82$$

$$VS_D = 1\,006 \text{ vph}$$

3. Intersección que controla la operación:

Volúmenes de servicio al nivel D:

Intersección 1) 761 vph

2) 992 vph

3) 1 272 vph

4) 1 006 vph

De acuerdo con lo anterior, la intersección 1 parece ser la que controla la operación; sin embargo, es necesaria una comparación de los volúmenes de demanda, antes de sacar las conclusiones finales.

Intersección 1:

$$700 \text{ vph} < 761 \text{ vph (} VS_D \text{) (satisfactorio)}$$

Intersección 2:

$$700 - 700(0.05 + 0.08) + 300 = 909 \text{ vph} < 992 \text{ vph (} VS_D \text{) (satisfactorio)}$$

Intersección 3:

$$909 - 909(0.13) + 250 = 1\,041 \text{ vph} < 1\,272 \text{ vph (} VS_D \text{) (satisfactorio)}$$

Intersección 4:

$$1\,041 - 1\,041(0.18) + 200 = 1\,054 \text{ vph} > 1\,006 \text{ vph (} VS_D \text{) (no satisfactorio)}$$

Conclusión:

Aun cuando en un principio y basándose en los volúmenes de servicio únicamente, parecía que la intersección 1 era la que controlaba, el análisis demuestra que bajo las condiciones de volúmenes de demanda que se tienen, la intersección 4 es realmente la más crítica. Esta intersección alcanzará primero la capacidad y su efecto repercutirá en otros puntos del tramo analizado.