

CAPITULO IV

4. — SEMAFOROS

4.1. GENERALIDADES

4.1.1. Conceptos Básicos

La principal función de un semáforo en el control de una intersección es el dar el paso a distintos grupos de vehículos (y peatones), de manera de que éstos pasen a través de la intersección con un mínimo de problemas, riesgos y demoras.

Los objetivos del diseño de una intersección controlada por semáforos pueden resumirse como sigue:

- i) Reducir y prevenir accidentes en la intersección y su cercanía inmediata.
- ii) Reducir las demoras que sufren peatones y vehículos al cruzar la intersección, incluyendo evitar el bloqueo de cruces por largas colas.
- iii) Reducir el consumo de combustibles en la intersección.
- iv) Reducir la emisión de contaminantes del aire y otros factores que deterioran el medio, como ser ruido.

Los dos primeros objetivos reciben generalmente la más alta prioridad en una intersección. Por supuesto interesa satisfacer estos objetivos con un mínimo de costo en el sistema de semáforos mismo.

Tiene mucha importancia el adoptar una metodología rigurosa en el diseño de intersecciones controladas por semáforos. Una metodología uniforme permitirá diseñar una intersección que cumpla los objetivos mencionados más arriba y al mismo tiempo asegurarse de que la mayor cantidad de aspectos relevantes ha sido tomada en cuenta.

Esta metodología general puede aplicarse a dos tipos de problemas de diseño:

- i) Diseño de una intersección controlada por semáforos donde en la actualidad existe otro sistema de control, como ser intersección prioritaria o rotonda.
- ii) Actualización y modificación del diseño de una intersección controlada por semáforo. La vida útil de un diseño en particular depende de:

- la tasa de crecimiento o variación de los flujos vehiculares o peatonales en la intersección.

— el advenimiento de nuevas tecnologías de control, por ejemplo, la integración de un semáforo en un sistema centralizado controlado por computador.

— Cambios en el uso del terreno adyacente a la intersección y el cambio del riesgo de accidentes que esto implica. Por ejemplo, el cambio de sector residencial a comercial.

En el desarrollo del presente Capítulo se darán a conocer todos aquellos problemas inherentes al diseño de semáforos y la manera de abordarlos, con el propósito que siguiendo posteriormente un esquema metódico se encuentre la mejor solución a los problemas que se presentan.

Tipos de semáforos

Se pueden distinguir los siguientes tipos de semáforos:

- i) Semáforo de tiempo programado fijo, en el cual la secuencia de fases presentadas al tránsito cambia según un programa fijo especificado externamente por el diseñador. Un semáforo puede tener varios programas, los que son activados a diferentes horas del día para adaptarse mejor a la demanda.
- ii) Semáforos regulados o activados por el tránsito, en los cuales la duración de cada fase y a veces su orden depende del tránsito mismo que usa la intersección. Esta demanda es identificada mediante detectores (neumáticos, lazos de inducción, etc.). La lógica básica también es especificada por el diseñador.
- iii) Conjunto de semáforos interconectados y coordinados.
En este caso los programas de cada semáforo son establecidos de antemano por el diseñador, quien además establece la forma en que éstos obedecerán a un control central.
- iv) Combinaciones de estos tipos, por ejemplo sistemas coordinados que también pueden responder a la demanda instantánea.

Colores

Los colores serán rojo, amarillo y verde. Están definidos en la norma N Ch 1437 III-79 del Instituto Nacional de Normalización.

4.1.2. Requisitos básicos para la instalación de semáforos

La instalación de un semáforo en un cruce de calles no se justifica en sí misma; sólo es válida si los beneficios superan las pérdidas o costos.

Ejemplo, en el estudio de una instalación de semáforos donde previamente existía una intersección controlada por regla prioritaria simple (derecho preferente de paso) se tendrán beneficios y costos, tales como:

- Cambio en el número y tipo de accidentes por año (o por millón de pasadas de vehículos). Este cambio es a menudo una reducción de accidentes pero puede ser también un aumento. En general se produce una reducción de accidentes en que los vehículos chocan a 90°. Pero puede haber un aumento de las colisiones entre vehículos que viajan en el mismo sentido.
- En algunos lugares se ha observado que el reemplazar una rotonda bien diseñada por semáforos aumenta el número de accidentes.
- Cambio en las demoras a vehículos, pasajeros y peatones. Si los flujos vehiculares son bajos este cambio puede ser un aumento de las demoras. Para flujos altos y un buen diseño, un semáforo debería reducir las demoras totales.
- Reducción de los costos de control policial de la intersección si ésta lo requiriera. No ocurre ello a menudo en Chile. Sin embargo, la presencia de un policía de tránsito tiene ventajas sobre un semáforo en términos de la seguridad de peatones, el ayudar a los vehículos que viran y controlar el tránsito para impedir la formación de atochamientos.
- Cambio de los costos de operación e índices de contaminación ambiental generados en la intersección. Estos costos generalmente dependen más del número de detenciones que de su duración.
- Costos de la inversión en semáforos y los cambios en la infraestructura que se le asocian.
- Costo de operación y mantenimiento del semáforo y equipo auxiliar.

El balance de estos costos y beneficios puede (adecuadamente desconectados en el tiempo) ser positivo o negativo. Aún más, dado que el tránsito varía a distintas horas del día y días en el año, el balance puede ser positivo para unas pocas horas de gran demanda y negativo para el resto.

Un análisis detallado de estos costos y beneficios requiere de considerable trabajo técnico, hoy en día sólo es posible gracias a programas de computación avanzados. Como una manera de reducir este trabajo, distintos países han adoptado requisitos o estándares mínimos para justificar la instalación de un semáforo.

Los requisitos básicos para la instalación de semáforos consideran, entre otros aspectos: volumen vehicular, volumen peatonal, accidentes, etc.

4.1.2.1. Volúmenes vehiculares requeridos

Este requisito se basa en los flujos vehiculares que usan la intersección y supone que es posible identificar una Arteria Principal y una Arteria Secundaria. Los flujos se miden en vehículos por hora (y no automóviles equivalentes).

VOLUMEN VEHICULAR MINIMO
CUADRO 4 A

N° de pistas por cada calzada de ingreso (ramal)		Volumen Minimo Veh./hr.	
Arteria Principal	Arteria Secundaria	Arteria Principal en ambas calzadas	Arteria Secundaria en calzada de mayor ingreso
1	1	500	150
2 o más	1	600	150
2 o más	2 o más	600	200
1	2 o más	600	200

Nota:

En cada una de las 8 horas de mayor demanda de un día promedio.

Como se ve, se requiere identificar las 8 horas de mayor demanda de un día promedio. A falta de mayores antecedentes se propone realizar conteos de tránsito durante las 12 horas comprendidas entre las 07.30 y las 19.30 hrs. Si sólo se pueden contar 8 horas, éstas deberían estar entre 07.30—10.30 hrs.; 12.30—14.30 hrs.; y 17.00—20.00 hrs., a menos que se cuente con antecedentes para identificar otras horas. Como día promedio puede escogerse un martes o jueves de los meses de marzo a noviembre tratando de evitar días feriados o sus contiguos, vacaciones escolares u otros días que se aparten de lo normal. Si existen razones para estimar que interesan las condiciones en otros días críticos (por ejemplo sábados en áreas comerciales), también deben tomarse conteos en esos períodos.

Para un adecuado uso de los datos en el futuro es recomendable mantener los conteos clasificados por tipo de vehículo, ver Cuadro 4 C, y por períodos no mayores de 30 minutos (se recomiendan 15 minutos). Conviene combinar esta etapa con una medición de los flujos en las corrientes o movimientos identificables en la intersección (Fig. 4.1).

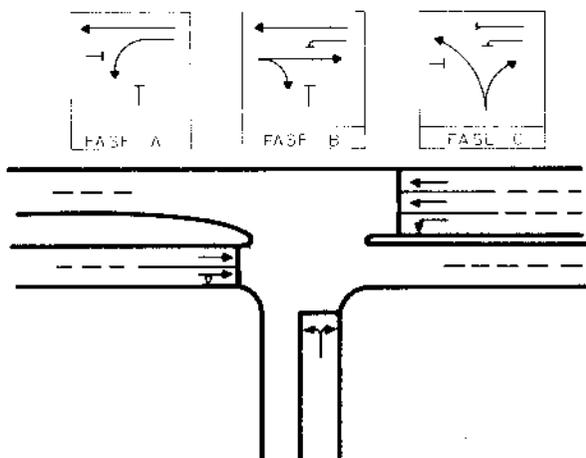


FIG. 4.1. EJEMPLO DE UN DIAGRAMA DE FASES Y PLAN DE UNA INTERSECCION.

4.1.2.2. Interrupción de la continuidad de flujo

Este requisito se aplica cuando los vehículos del acceso no prioritario sufren demoras excesivas.

VOLUMEN VEHICULAR MINIMO (Veh/hr)

CUADRO 4 B

Nº de pistas por cada calzada de ingreso		Arteria Principal	Arteria Secundaria
Arteria Principal	Arteria Secundaria	Total ambas calzadas	En calzada mayor volumen
1	1	750	75
2 o más	1	900	75
2 o más	2 ó más	900	100
1	2 ó más	750	100

Nota:

En cada una de las 8 horas de mayor demanda de un día promedio.

De acuerdo con este requisito no se trata de minimizar las demoras totales, sino de reducir demoras inusitadamente largas para los vehículos de la arteria secundaria.

4.1.2.3. Consideraciones relativas a virajes

Es común el caso en el cual parte de los flujos vehiculares de la calzada secundaria que acceden a una vía principal de doble sentido de tránsito no la crucen, sino que se incorporan a ésta efectuando un viraje. En estos casos los criterios de justificación se analizarán separadamente para cada uno de los flujos del acceso secundario (rama de mayor volumen) de la siguiente forma:

- El flujo vehicular que proviene de la calzada secundaria se comparará con el flujo vehicular sobre la calzada adyacente de la vía principal.
- El flujo vehicular que vira a la izquierda o sigue derecho desde la calzada secundaria se comparará con el flujo vehicular de la arteria principal en ambas calzadas.

El semáforo se considerará justificado si para cualquiera de los dos casos se cumple alguno de los criterios de justificación relativos a volúmenes vehiculares.

4.1.2.4. Movimiento progresivo

Ocasionalmente es conveniente instalar un semáforo, que no se justifica de otra manera, para mantener el movimiento progresivo de vehículos (pelotones o grupos) o a lo largo de un corredor de semáforos coordinados. En sistemas de semáforos controlados por computador se utiliza el mismo argumento para reemplazar otros tipos de control, a menudo rotondas por semáforos.

Se requieren en este caso dos elementos:

- un sistema efectivamente coordinado de semáforos.
- La existencia de una intersección en condiciones de flujo tal que de no instalarse un semáforo interrumpiría un adecuado avance progresivo de vehículos a lo largo del corredor.

Cabe destacar que a menudo basta con mejorar la demarcación de prioridad en la intersección para preservar el movimiento progresivo sin incurrir en mayores gastos.

4.1.2.5. Accidentes

Se ha señalado que la instalación de un semáforo puede reducir accidentes. Pero también la instalación de semáforos donde no son necesarios puede hacer que algunos conductores irritados por demoras excesivas (y no justificadas) dejen de respetar las señales. En este caso ese semáforo mal instalado generará más accidentes, la mayor parte de los cuales ocurrirá en otros cruces con semáforos bien justificados. Un semáforo deficientemente mantenido generará más accidentes en vez de disminuirlos.

Se requiere entonces bajo este requisito que el riesgo de accidentes en la intersección sea manifiesto y que hayan ocurrido 5 o más accidentes de cierta consideración por año en los últimos 3 años.

4.1.2.6. Consideraciones especiales

Es importante tomar en cuenta que en ciertas ocasiones la instalación de un semáforo puede ser innecesaria, aun cuando alguno de los requisitos anteriores se cumpla. Esto puede darse en alguno de los siguientes casos:

- la presencia de semáforos en intersecciones cercanas genera interrupciones en el tránsito que permiten el cruce de vehículos en la arteria secundaria.
- la presencia de vehículos lentos puede generar también interrupciones en el tránsito prioritario.
- un alto porcentaje de virajes a la izquierda puede ser atendido mejor si se instala una rotonda de diámetro pequeño, siempre que el terreno disponible lo permita.

En cualquiera de estos casos parece más conveniente no instalar semáforos, sino mejorar la intersección prioritaria o diseñar una rotonda. La preocupación primordial debe ser reducir demoras y accidentes.

4.2. Estudios Preliminares

Esta sección entrega una versión resumida del proceso de diseño de semáforos de una intersección. Para este estudio preliminar se entregan varias aproximaciones rápidas que son sólo aceptables en un primer esbozo de cálculo.

Aspectos más precisos y detallados para el diseño de una intersección controlada por semáforos se entregan en secciones posteriores.

4.2.1. Capacidad de un movimiento o corriente

Se considera primero el caso de un movimiento que opera durante una fase totalmente saturada, es decir, una fase al final de la cual todavía

quedan vehículos en la cola que no han podido cruzar la intersección.

Se realizan observaciones durante una o más

fases de este tipo para un movimiento en particular; éstas pueden presentarse en un gráfico como en Fig. 4.2.

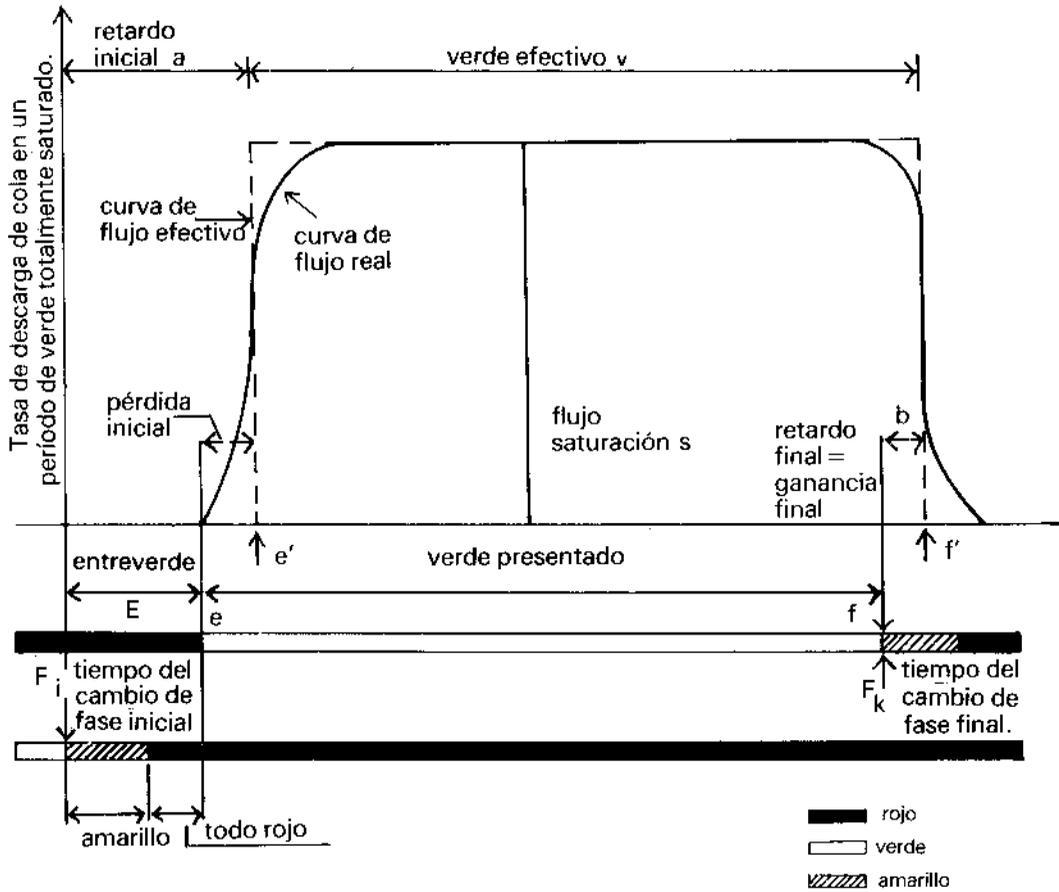


Fig. 4.2. MODELO BASICO Y DEFINICIONES

4.2.2. Flujos de saturación

En general es deseable obtener mediante observaciones los flujos de saturación de cada una de las calzadas de un cruce. Para ello se recomienda el método descrito en el anexo D. Si esto no es posible pueden tomarse como base valores contenidos en diversos manuales. Estos valores pueden depender del número de pistas, su ancho, de la existencia de vehículos estacionados y peatones, de la localización de la intersección, de la proporción de vehículos que viran a la izquierda/derecha, gradiente, etc.

La influencia de vehículos pesados o lentos sobre los flujos de saturación se expresa a través de coeficientes de corrección, llamados "automóviles equivalentes". Estos indican el número de automóviles particulares que producen el mismo efecto que un vehículo de otro tipo en una intersección controlada por semáforo. Como se ve más adelante, un automóvil que vira en la intersección (especialmente a la izquierda) genera más demoras que uno que sigue directo. Por ello y para precisar mejor el concepto, este Manual adopta como unidad básica para flujos de saturación el Automóvil Directo Equivalente, ADE (o vehículos equivalentes).

Se observa que en la práctica el principio de la fase verde lo ocupan pocos vehículos por segundo, debido a que éstos están acelerando y que algunos demoran en partir. Cuando el color amarillo aparece, los vehículos empiezan a frenar y el flujo (por segundo) disminuye hasta que se hace cero.

El modelo que comúnmente se usa en estos casos es reducir estos fenómenos a dos etapas:

- rojo efectivo, durante el cual ningún vehículo de la corriente cruza la intersección.
- verde efectivo, durante el cual el flujo máximo de vehículos puede cruzar la intersección. Este flujo máximo se llama flujo de saturación.

El modelo supone que ningún vehículo sale durante el período de rojo efectivo y que todos salen durante el período verde efectivo. Se observa también en la práctica, que por razones de seguridad partes del ciclo completo de un semáforo no son utilizadas en la descarga de vehículos. Esta parte se llama tiempo desaprovechado o "tiempo perdido". El período de verde efectivo corresponde, para una corriente de tránsito, a la suma del período verde más el período amarillo menos el tiempo desaprovechado correspondiente.

Las equivalencias serán las siguientes:

AUTOMOVILES DIRECTOS EQUIVALENTES ej.

CUADRO 4 C

Tipo de Vehículo	Directo	Virajes	
		A la Derecha	A la Izquierda
Automóvil, Camioneta (<500 Kgs.)			
Taxi (ocupado)	1.00	1.25	1.75
Taxi sin pasajeros	1.35	1.50	1.75
Taxibús	1.65	1.80	2.30
Bus, camión liviano (< 10 tons.)	2.00	2.50	3.00
Camión pesado (≥ 10 tons.)	2.50	3.00	4.00
Motocicleta	0.50	0.60	0.80
Bicicleta	0.20	0.30	0.50

Si no es posible obtener los flujos de saturación mediante observaciones se proponen las siguientes aproximaciones que dependen del entorno de la intersección.

FLUJOS DE SATURACION BASICOS POR PISTA s_b

CUADRO 4 D	
ENTORNO	Flujo Saturación por pista en ADE
Zona céntrica, muchos peatones, poca visibilidad	1.650
Zona urbana, pocos peatones, buena visibilidad	1.840

Estos valores deben corregirse por el ancho de la pista considerada (si éste es mayor que 3.70 m. o menor que 3.00 m.), por la pendiente de la calle y por la composición de vehículos y virajes. De esta manera se obtiene el flujo de saturación de cada pista en término de vehículos reales. En otras palabras, el flujo de saturación en vehículos por hora es:

$$S = (f_a \cdot f_g / f_c) s_b \quad (422.1)$$

donde:

- S = flujo de saturación en vehículos reales por hora
- s_b = flujo de saturación básico en ADE/hora de Cuadro 4 D.
- f_a = coeficiente de corrección por ancho de pista a
- f_g = coeficiente de corrección por pendiente g
- f_c = coeficiente de corrección por composición del tránsito.

Esto se obtiene de:

$$f_a = \begin{cases} 0.55 + 0.14_a & \text{para } a < 3.00 \text{ m (mínimo } a = 2.40) \\ 1.0 & \text{para } 3.00 \leq a \leq 3.70 \\ 0.83 + 0.05_a & \text{para } a > 3.70 \text{ (máximo } a = 4.60) \end{cases} \quad (422.2)$$

$$f_g = 1 + 0.5 \cdot g/100 \quad (422.3)$$

en que la pendiente g en % se define como positiva si es cuesta abajo y negativa si es cuesta arriba

$$f_c = \frac{\sum e_j \cdot q_j}{q} \quad (422.4)$$

donde e_j se obtiene del Cuadro 4 C.

q_j : flujo en veh/hora del tipo j
 q : flujo total en veh/hora

Cabe señalar que el valor resultante S es el flujo de saturación medido en vehículos reales por hora DE VERDE. Debido a la necesidad de asignar verde a diferentes corrientes de vehículos, la capacidad total de una intersección es siempre inferior a la suma de los flujos de saturación de cada calzada (calculados como la suma de los flujos de saturación de cada corriente).

4.2.3. Cálculo de ciclo

Por razones de seguridad es necesario diseñar cada cambio de fases en un ciclo de modo que aquellos vehículos que se encontraban cruzando la intersección la despejen antes que otro grupo de vehículos (o movimientos) reciba una indicación verde. Esto se consigue generalmente con un adecuado diseño la duración del período amarillo y con la introducción de un breve período en que TODAS las corrientes enfrentan rojo. Este período TODO ROJO puede ocurrir para cada cambio de fase.

Una parte de la duración de cada ciclo estará compuesta por tiempo durante el cual el flujo de saturación de cada calzada no puede ser utilizado. Este período se llama **Tiempo perdido total** y está compuesto por la suma de:

- i) El tiempo durante el cual todas las corrientes enfrenten un rojo para despejar la intersección. Mínimo normal es 1 seg.
- ii) El tiempo perdido en cada transición de verde a rojo el que generalmente se estima en 2 seg. Este valor supone una duración del amarillo de 3 seg.

El tiempo perdido total por ciclo se representa por la letra L . El tiempo perdido total debe incluir también la duración de toda fase peatonal en que los vehículos enfrentan luz roja (parte del todo rojo).

Para cada movimiento es necesario calcular el indicador γ (cuociente o razón de flujo).

$$\gamma = q/S \quad (423.1)$$

como el volumen (vehicular real por hora) dividido por el flujo de saturación correspondiente (VPHV).

Para cada fase se elige el Y máximo como indicador representativo y el indicador total para el semáforo es:

$$Y = \sum_{\text{fases}} Y_{\max} \quad (423.2)$$

es decir, la suma de las razones de flujo representativas de cada fase.

El ciclo óptimo se calcula como

$$C_o = \frac{1.5L + 5}{1 - Y} \quad (\text{segundos}) \quad (423.3)$$

donde:

$$C_o = \text{ciclo óptimo}$$

El ciclo óptimo minimiza las demoras totales para las corrientes representativas en cada fase.

El ciclo mínimo (más corto) está dado por

$$C_m = \frac{L}{1 - Y} \quad (423.4)$$

Existe cierta flexibilidad en la selección de un ciclo ya que las demoras totales no cambian mucho dentro del rango $0.75 C_o$ a $1.5 C_o$. En general los ciclos adoptados tienen entre 40 y 120 segundos de duración con una media alrededor de 70 - 80 segundos.

4.2.4. Capacidad de reserva

La forma más sencilla de aumentar la capacidad de una intersección controlada por semáforos es utilizar un ciclo más largo. La capacidad máxima se encuentra al utilizar el ciclo máximo (120 segundos). La capacidad práctica se estima como el 90% de la máxima y se calcula a partir del valor γ correspondiente

$$Y_p = 0.9 \left(1 - \frac{L}{C_{\max}} \right) \quad (424.1)$$

Otro aspecto importante de una intersección es su capacidad de reserva, es decir, su habilidad para acomodar flujos crecientes sin llegar a la saturación total del ciclo:

La capacidad de reserva se puede calcular como:

$$C_r = \frac{0.9}{Y} \left(1 - \frac{L}{C_{\max}} \right) - 0.9 \quad (424.2)$$

4.2.5. Duración de verde

Es necesario considerar la duración de la fase verde para cada movimiento. El valor deseado de esta duración está dado aproximadamente por

$$V_i = \frac{q_i \cdot C}{S_i \cdot Y} = Y_i \frac{C}{Y} \quad (425.1)$$

V_i = Duración de verde para movimiento i (seg.)

q_i = volumen del movimiento i (VPH)

S_i = flujo saturación (VPHV)

C = ciclo adoptado (seg.)

Por supuesto, cuando varios movimientos comparten la misma fase, la duración de ésta viene determinada por el máximo de estos valores deseados.

Es necesario tomar en cuenta también que la aplicación directa de estas relaciones puede resultar en duraciones del verde demasiado cortas. La duración de una fase debe por lo menos permitir el cruce de la calzada por parte de los peatones que tienen derecho de paso en la fase.

La duración de la fase también debe ser corregida por los siguientes factores:

- producción de colas excesivamente largas
- arreglos especiales para permitir a ciertos vehículos realizar virajes a la izquierda
- necesidades de peatones, ver sección 4.8.

4.3. DISEÑO DEL SISTEMA

4.3.1. Selección del Período de diseño

El diseño de semáforos debe basarse en la (s) hora de demanda máxima por medio de los días hábiles (lunes a viernes). Sin embargo un período corto de demanda significativamente mayor (por

ejemplo de media hora de máx.) puede utilizarse para el diseño de fases y repartos.

Los equipos modernos de control permiten el uso de ciclos y repartos (y a veces fases) diferentes en distintos períodos del día y la semana. Se recomienda que toda nueva instalación contemple al menos 3 planes distintos (hora de demanda máxima de la mañana, de la tarde y otra hora cualquiera). En muchos casos, puede ser deseable el uso de más de 3 períodos.

Es importante realizar cálculos separados de fases, repartos y ciclos para los períodos de demanda máxima mañana, la tarde y un período convencional que no sea de demanda máxima.

4.3.1.1. Flujos de diseño

El diseño de semáforos debe basarse en flujos observados y mediciones en terrenos de flujo de saturación y tiempos perdidos para cada movimiento. En el caso de semáforos nuevos o modificaciones a semáforos existentes, el diseño debe basarse en los flujos que se estime existieron en la fecha de su inauguración. Esto requiere estimar estos flujos mediante la aplicación de tasas de crecimiento para el período comprendido entre la fecha en que los volúmenes vehiculares y peatonales fueron observados a la fecha estimada de la implementación del nuevo diseño. La tasa de crecimiento anual de estos flujos dependerá de las condiciones locales, y será estimada con mayor precisión en la medida en que la Municipalidad cuente con un sistema de conteos permanentes en la intersección bajo su jurisdicción.

En ausencia de estos antecedentes se propone utilizar una tasa de crecimiento de los flujos del 10% al año.

En el caso de tasas de crecimiento mayores conviene usar para el diseño los flujos que se esperan para 6 meses después de la implementación del mismo.

4.3.1.2. Correcciones y puesta al día de diseño

Los niveles de flujo de una intersección así como las características de utilización de las pistas no permanecen fijas en el tiempo. Estas características cambian con el tiempo debido al cambio que experimentan los viajes, la tasa de motorización y el número de habitantes de una ciudad. Aún más, la mejora de otras intersecciones en las cercanías también afectará los flujos que fueron utilizados en el diseño de un semáforo.

Es necesario establecer un programa regular de puesta al día de los diseños de intersecciones controladas por semáforos. Se sugiere que el diseño de cada intersección controlada por semáforos se revise al menos una vez cada dos años.

De la misma manera vale la pena tener una lista de intersecciones posibles de ser semaforizadas. Los flujos que la utilizan serán también puestos al día regularmente (cada 2 años) para estimar cuándo se justificará su mejoramiento a rotonda, mini-rotonda o semáforo.

4.3.2. Diseño Geométrico

4.3.2.1. Ancho de las calzadas

Aunque no siempre es posible modificar el ancho de las calzadas de una intersección controlada por semáforos, vale la pena discutir la influencia de las características físicas de una intersección sobre su comportamiento y rendimiento. Fig. 4.3.

El aumento del ancho de las calzadas en la boca de la intersección mejora su capacidad y permite mejores asignaciones de fases. Para intersecciones de tipo cruz los anchos óptimos vienen dados aproximadamente por:

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{d_1}{d_2} = \sqrt{\frac{q_1}{q_2}} \quad (432.1)$$

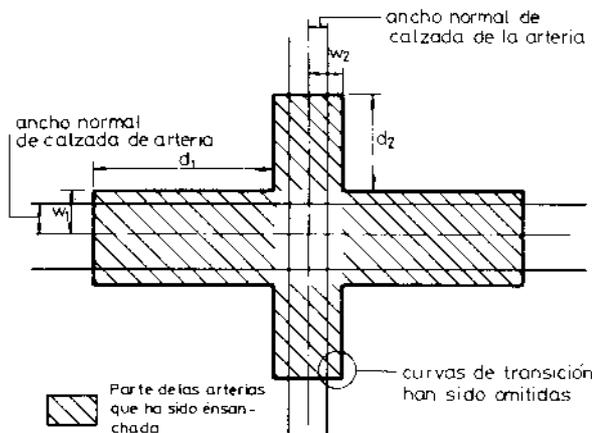


Fig. 4.3. MODIFICACION DE ARTERIAS EN LAS CERCANIAS DE SEMAFORO

donde:

w_1 y w_2 son los anchos de las calzadas, en metros

d_1 y d_2 el largo del ensanchamiento, en metros

q_1 y q_2 los flujos representativos en vehículos por hr.

v_1 y v_2 el largo deseable de las fases verdes (seg).

la regla puede extenderse a intersecciones más complejas.

$$w_1 : w_2 : w_3 = d_1 : d_2 : d_3 = v_1 : v_2 : v_3 = \sqrt{q_1} : \sqrt{q_2} : \sqrt{q_3} \quad (432.2)$$

y la misma relación puede adoptarse cuando los flujos no están perfectamente balanceados. Debe considerarse, sin embargo, que los flujos de la tarde pueden ser la imagen opuesta de los flujos de la mañana (máximo), tendiendo de esta manera a balancearse.

4.3.2.2. Espacio para virajes a la izquierda

Si la cantidad de vehículos que desean virar a la izquierda es menor que 250 VPH, éstos no requerirán probablemente ninguna disposición especial. Es conveniente asegurarse, sin embargo, que estos vehículos tienen espacio suficiente para esperar en la intersección hasta que se produzca un espacio adecuado en el flujo opuesto que obstaculiza el viraje.

Si el flujo que desea virar a la izquierda es mayor, vale la pena considerar un corte prematuro del flujo opuesto, de manera de permitir el despeje de la intersección por parte de los vehículos que desean virar.

Si el flujo es tal que una fase especial se requiere para controlar los virajes a la izquierda, puede ser conveniente desfazar ligeramente la línea central en cada calzada como muestra la figura 4.4.

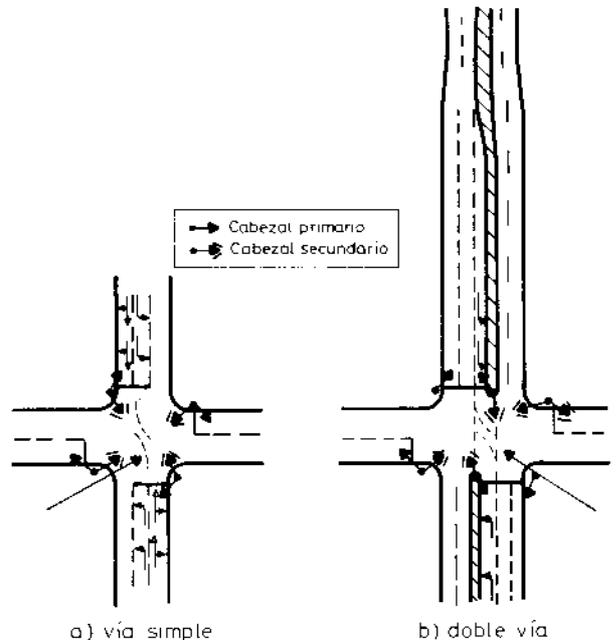


Fig. 4.4. DISEÑO SUGERIDO PARA SITUACIONES CON DOS VIRAJES OPUESTOS A LA IZQUIERDA

No es recomendable considerar una fase especial para virajes si no se puede asignar una pista exclusiva con ese objeto.

4.3.2.3. Virajes a la derecha

Se propone extender en forma experimental el viraje con precaución de vehículos a la derecha a lo largo de todo el ciclo (incluyendo cuando enfrentan rojo) bajo las siguientes condiciones:

- que el flujo que vira a la derecha sea menor o igual a 150 VPH.
- que el flujo cruce un flujo peatonal no mayor a 150 peatones por hora.
- que el radio de curvatura en la intersección sea superior a 10 metros, y exista buena visibilidad.

— que el viraje durante el rojo sea con precaución, equivalente a una señal CEDA EL PASO.

En una primera etapa se escogerá un número reducido de intersecciones donde esto sea posible y se las señalizará adecuadamente. En lo posible se proveerá una canalización adecuada para los virajes a la derecha.

Incluir una señal fija con la leyenda Autorizado Virar Derecha con Luz Roja y Precaución.

4.3.2.4. Ancho y disposición de las pistas

El ancho de las pistas debe ser de 3.00 metros aunque se puede aceptar anchos de hasta 2.75 m. en pistas usadas exclusivamente por automóviles particulares. Si la proporción de vehículos pesados es 10% o más el ancho deseable de las pistas es por lo menos de 3.30 metros.

La pista más cercana a la acera también debería tener al menos 3.30 metros de ancho para facilitar su uso a los ciclistas.

Es conveniente asignar pistas a diferentes tipos de movimiento, e indicar esta asignación mediante flechas pintadas sobre el pavimento. Esto ayudará a los conductores a elegir qué pista usar.

En esta asignación es deseable tratar de obtener una equilibrada utilización de las pistas, de modo que la capacidad de la intersección se aproveche en su totalidad.

Es importante prohibir el estacionamiento de todo vehículo en las cercanías de la intersección, al menos en los últimos 45 metros a cada lado de los ramales de ésta. Lo mismo debe aplicarse al

emplazamiento de paraderos de locomoción colectiva (ninguno a menos de 45 metros de la línea de detención).

Si debido a restricciones físicas una pista tiene ancho variable en las cercanías de una intersección, considere su ancho efectivo para los efectos del cálculo de los flujos de saturación como el ancho mínimo de los últimos 30 metros.

4.3.2.5. Ubicación de los semáforos

Las caras de un semáforo deben ubicarse en un cabezal sobre un poste especial. En ciertas circunstancias puede ocuparse algún poste existente, pero esto no se recomienda. Para cada calzada habrá por lo menos un cabezal con la señal primaria y uno con la secundaria.

El cabezal primario se instalará en un poste al lado derecho de la calzada y a no más de 2 metros de la línea de detención, y el otro cabezal secundario estará ubicado en forma diagonal opuesto del primario (probablemente en el mismo poste de la señal primaria del sentido opuesto) (Ver Fig. 4.5 y 4.6.).

El objeto de la señal primaria es demarcar claramente la línea de detención, la que no debe atravesarse con rojo (y proteger al mismo tiempo el cruce peatonal). La señal secundaria refuerza a la primaria y es más fácilmente visible a los vehículos detenidos en la línea de detención.

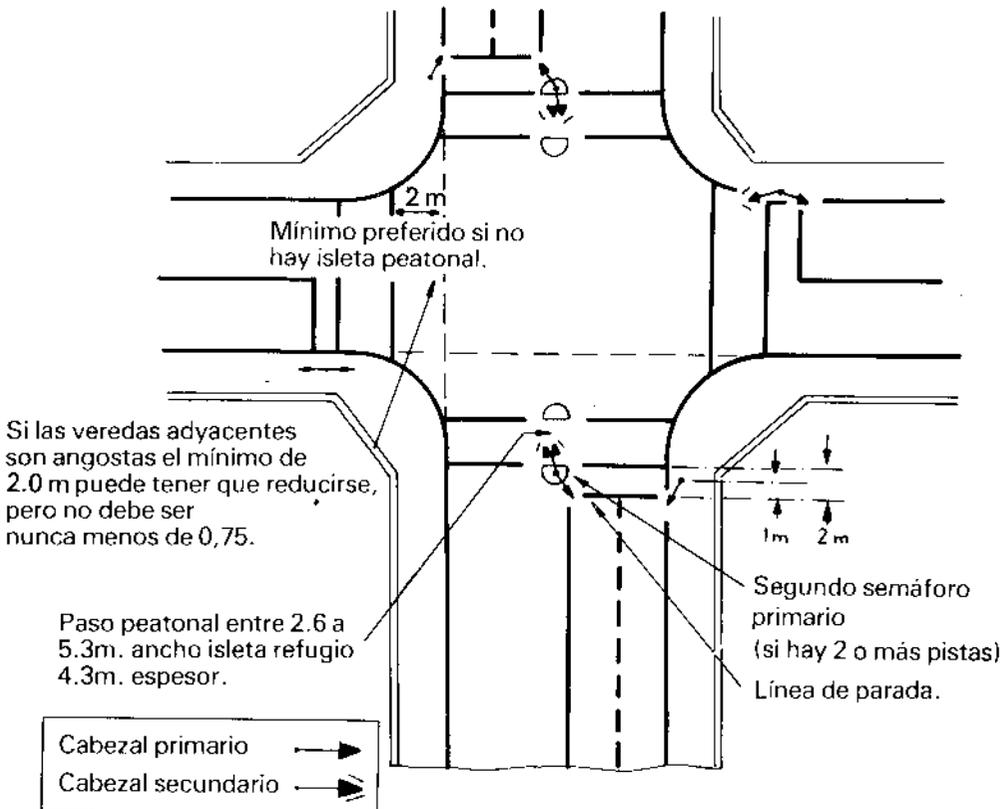


Fig. 4.5. DISEÑO BASICO DE INTERSECCION

En aquellos sitios en que no haya indicación especial para peatones conviene asegurarse que éstos tengan buena visibilidad de los colores que percibe el tránsito.

Es muy importante asegurarse que la visibilidad de los cabezales no sea obstruida por la presencia de letreros, postes, vegetación, árboles, etc. Conviene verificar este punto al menos una vez al año (en primavera), como parte del programa de mantenimiento de semáforos . Asimismo es necesario asegurarse de que no existan avisos, propaganda ni otros objetos que distraigan al conductor en las cercanías de los cabezales. La visibilidad de un cabezal es fundamental.

Toda nueva instalación debe seguir la norma propuesta aquí y se sugiere que las instalaciones antiguas se modifiquen en la medida en que sea necesario modernizar el equipo usado.

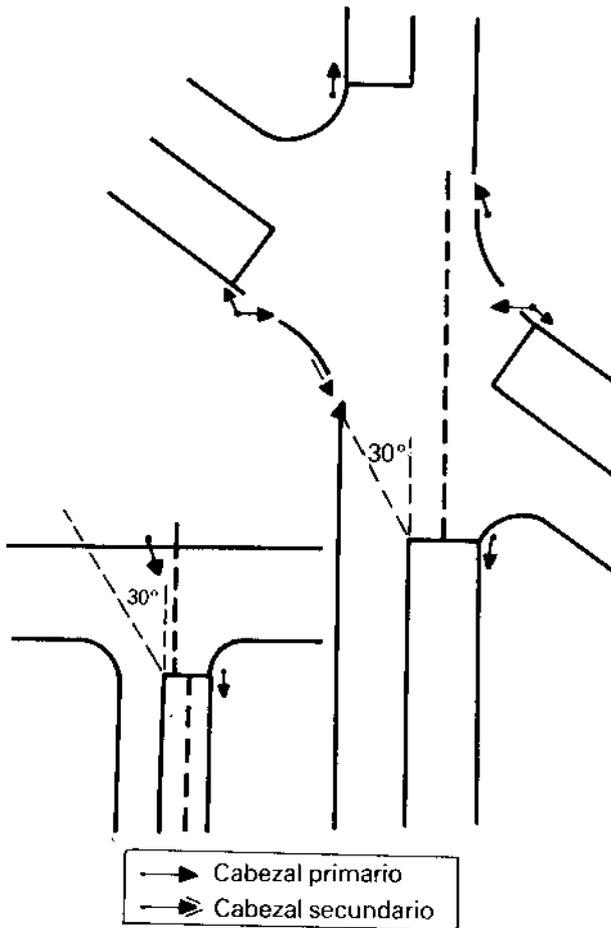


Fig. 4.6 LOCALIZACION TIPICA DE CABEZALES

4.3.2.6. Configuración de postes y cabezales

i) Configuración de postes

La parte inferior de un semáforo montado en un poste o pedestal debe estar a no menos de 2,4 metros y no más de 4 metros del nivel de la acera o de no existir ésta, del pavimento.

Si la visibilidad es deficiente se montará al cabezal en una ménsula, báculo o brazo largo por sobre las pistas de circulación. La altura sobre el pavimento de la base del cabezal deberá estar comprendida entre 4,5 y 5,2 metros en este caso.

Con el objeto de evitar el contacto entre vehículos en movimiento y los postes que sustentan los cabezales, éstos se ubicarán de modo que su parte más saliente a menos de 4,5 metros del pavimento, se encuentre a no menos de 60 cm. del borde de la pista de circulación más cercana.

ii) Cabezales vehiculares

Los cabezales destinados al control del tráfico vehicular tendrán una configuración vertical de luces, las que incluirán por lo menos una roja, una amarilla y una verde, en ese orden desde arriba hacia abajo. En algunos casos será conveniente utilizar una o varias flechas verdes para precisar el o los movimientos que tienen derecho preferente de paso. En este caso dichas indicaciones se localizarán en forma adyacente a la luz verde, o la reemplazarán cuando todos los movimientos posibles desde la respectiva línea de detención estén controlados por indicaciones de flecha verde. Las configuraciones recomendadas se indican en la figura 4.7.

No se aceptará el uso de flechas luminosas de otro color en un cabezal. Se utilizarán dos diámetros nominales de los lentes de un cabezal, estos son 200 y 300 mm. con una tolerancia de ± 5 mm. Los lentes de 300 mm. de diámetro sólo serán utilizados para las indicaciones de flecha verde — según diseño indicado en la figura 4.8— o para proveer en el cabezal vehicular de señales reglamentarias iluminadas interiormente y destinadas a ser operadas en determinados horarios o circunstancias. Igualmente podrán usarse lentes de 300 mm. de diámetro para indicaciones en intersecciones con problemas especiales como interferencia inevitable de avisos u otras fuentes luminosas. El cabezal vehicular estará provisto de un tablero negro de respaldo cuya superficie mínima se define por los siguientes límites:

- 300 mm. sobre el centro del lente superior.
- 280 mm. a ambos lados de la línea de eje del cabezal.
- 260 mm. bajo el centro del (los) lente (s) inferiores.

SIMBOLOS Y CONFIGURACIONES DE CABEZALES VEHICULARES

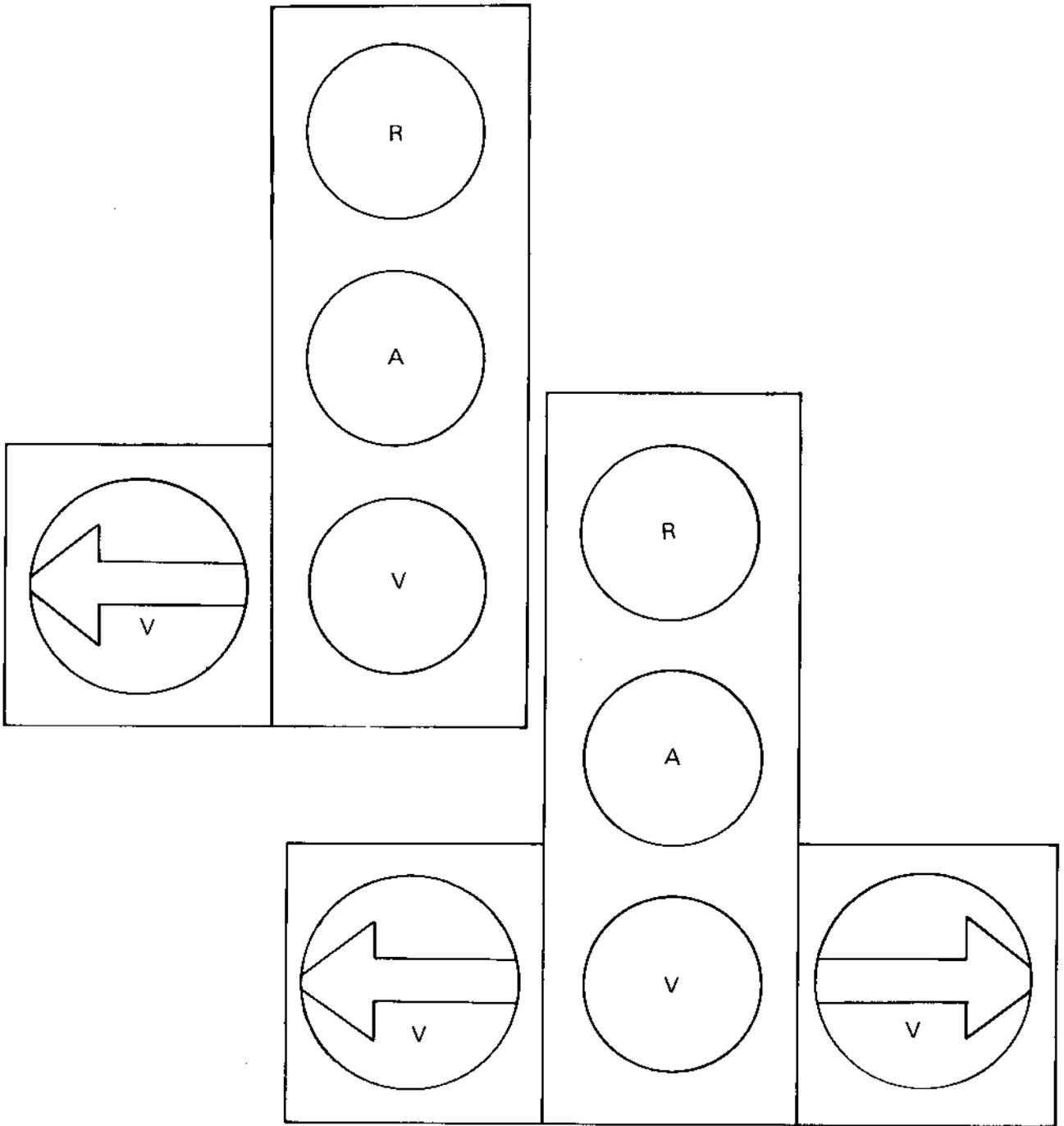
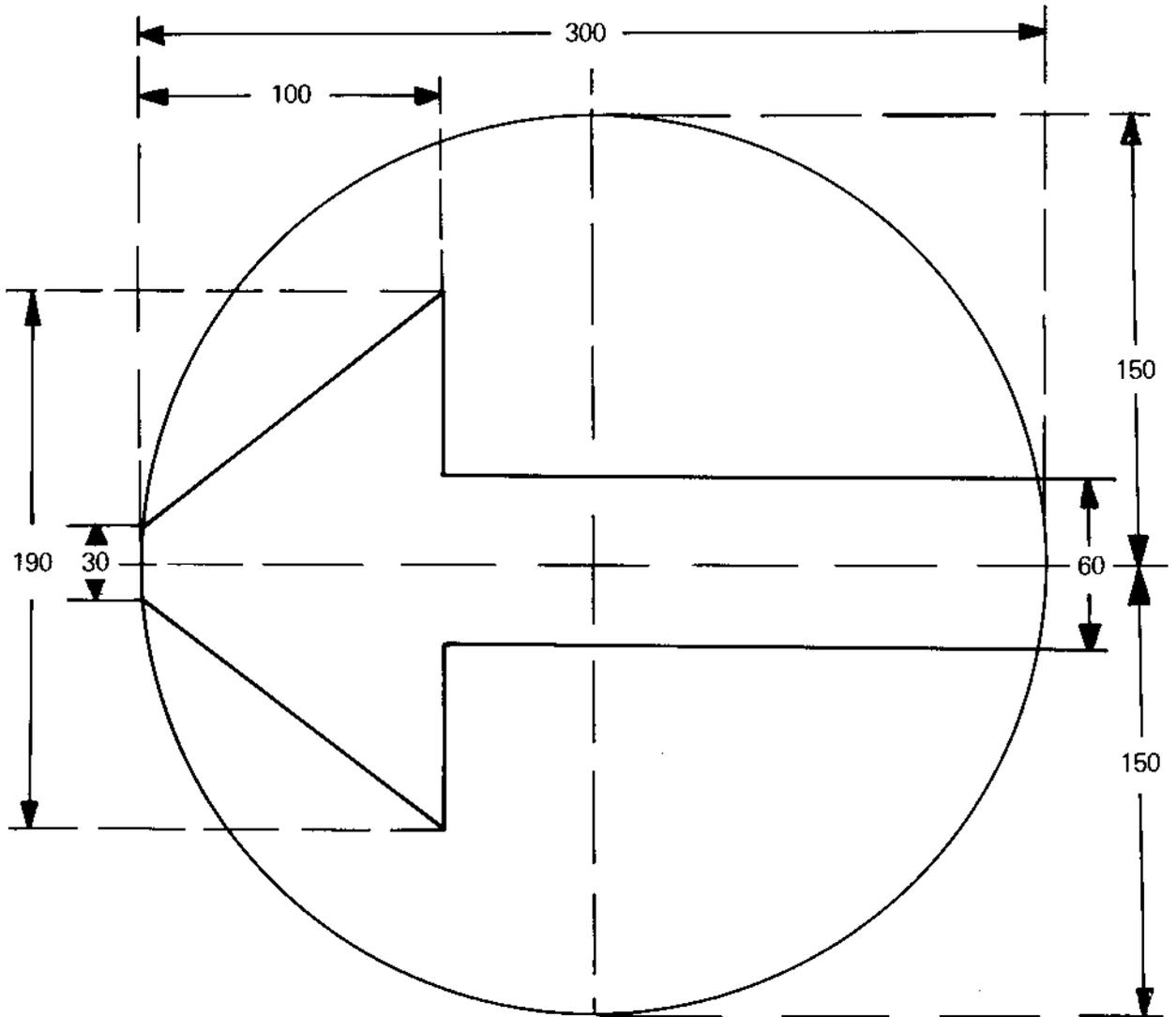


Fig. 4.7

LENTES CON FLECHAS DE 300 mm DE DIAMETRO (12")



COTAS EN MILIMETROS

TOLERANCIAS $\pm 10\%$

Fig. 4.8

En el caso de existir lentes laterales, dicha placa se extenderá 230 mm. hacia afuera y arriba del centro de dicho (s) lente (s).

La placa de respaldo estará provista de un borde blanco de 50 mm. \pm 10% de ancho, en las esquinas tendrá un radio exterior de 50mm. y un radio interior de 12.5 mm. El tablero deberá estar localizado aproximadamente en el mismo plano que los lentes, y cada lente estará provisto de la correspondiente visera.

Los cabezales, al igual que las caras y postes de los semáforos, deben ser de color negro.

iii) Cabezales peatonales

Los cabezales destinados a informar a los peatones sobre cuando se les concede derecho de paso tendrán una configuración vertical de luces según se indica en la figura 4.9. No deberán ser provistos de placa de respaldo, pero sí tendrán una visera corta.

La fuente de luz para cada lente del semáforo será una ampolleta del tipo halógeno de 12 (V). El controlador del semáforo deberá estar provisto de

un dispositivo que disminuya la intensidad luminosa de todas las ampolletas del semáforo en los horarios de bajo nivel de luminosidad ambiental.

Dicha función se efectuará disminuyendo el nivel de tensión con que estén energizados los cabezales del semáforo a 160 volts (RMS).

Al acercarse a una intersección los conductores deberán poder percibir todas las indicaciones de, al menos, dos cabezales vehiculares del semáforo a una distancia de 80 metros. Cuando el límite de velocidad sea mayor que 50 Km./h. dicha distancia será de 200 metros, todo ello sin la presencia de neblina. En caso que ésto no pueda lograrse, la presencia del semáforo deberá ser anunciada usando la señal preventiva correspondiente.

Durante el diseño e instalación de un semáforo deberá prestarse mucha atención al evitar la obstrucción de la visibilidad de todos los cabezales por letreros, avisos, árboles, etc. Igualmente será necesario retirar avisos y otras indicaciones que distraigan al conductor o puedan interferir con una adecuada percepción de las indicaciones presentadas en los cabezales.

No se aceptarán leyendas (PARE/SIGA, etc.) en ningún lente de un semáforo.

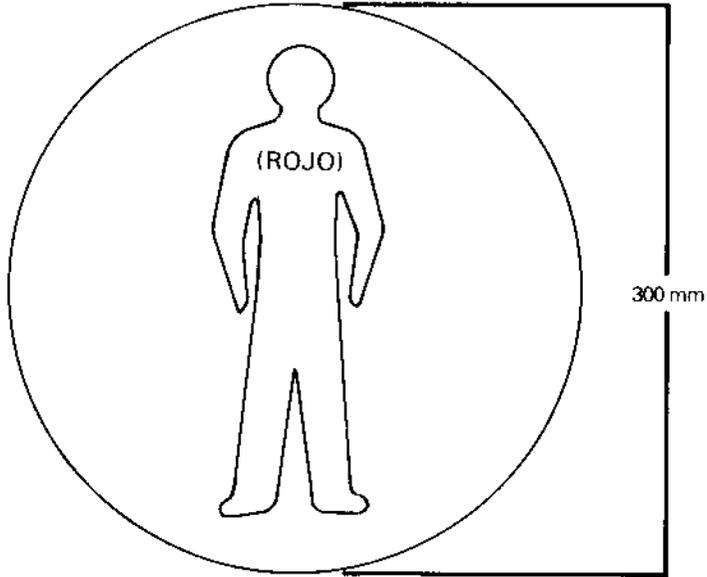
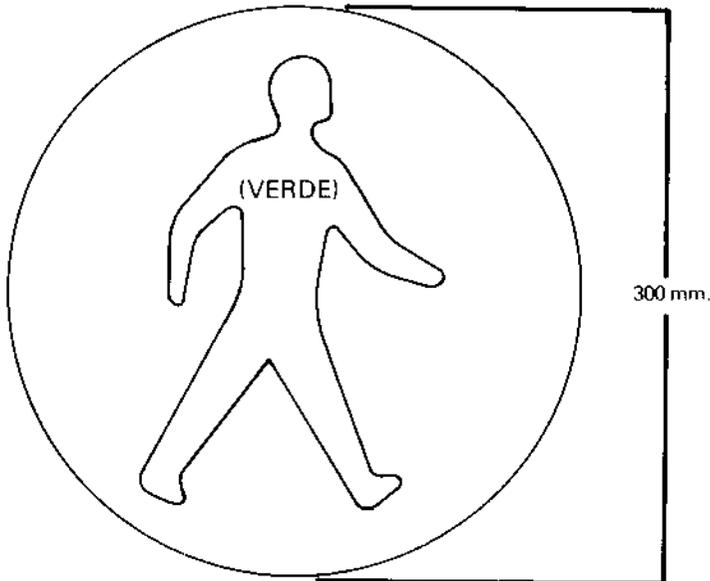


FIGURA 4.9



4.4. MOVIMIENTO, FASES Y CICLOS

Los principios generales descritos en las secciones anteriores pueden usarse directamente en el diseño de intersecciones sencillas, por ejemplo de cuatro calzadas, pocos virajes a la izquierda, en las cuales dos fases son suficientes para acomodar todos los movimientos.

Es conveniente, sin embargo, contar con las herramientas de análisis que permiten un estudio más acabado de intersecciones más difíciles y que pueden requerir un tratamiento más especial. La tecnología misma de los controladores de semáforos está cambiando bastante a raíz del uso creciente de microprocesadores electrónicos. Estos nuevos controladores permiten el diseño de planes de control de semáforos mucho más flexibles pero también más complejos que los sistemas convencionales.

Es importante entonces entender bien cómo se relacionan los movimientos, fases y ciclos de un semáforo. Esto se detalla a continuación:

4.4.1. Movimientos

La mejor manera de identificar un movimiento o corriente es mediante el comportamiento de las colas de vehículos en cada calzada de la intersección. Cada grupo de vehículos que puede caracterizarse por su dirección, uso de pistas y provisión de derecho a paso constituye un movimiento. Como puede verse la identificación de un movimiento no es independiente del programa de fases de la intersección.

Una fase del semáforo es aquel periodo durante el cual los movimientos que tienen derecho de paso no cambian; en otras palabras, durante una fase no hay cambios en los colores que presenta un semáforo.

Los movimientos se describen primariamente de acuerdo con el derecho de paso que les corresponde por el diagrama de fases. Un mecanismo adicional para describir movimientos es el siguiente:

- i) el tránsito que usa una pista exclusiva se define como un movimiento.
- ii) si hay pistas subutilizadas el tránsito que las usa constituye un movimiento separado.
- iii) Se combina el tránsito en aquellas pistas que tienen igual grado de utilización (incluyendo pistas compartidas) y se considera que esos flujos constituyen un movimiento.

La primera regla (i) produce un alto número de movimientos. Estos pueden reducirse considerando la regla (iii) y la limitación de la regla (ii). Hay una interrelación directa entre la definición de movimientos y los flujos de saturación correspondientes. Si por alguna razón una pista se encuentra subutilizada (por ejemplo, los automovilistas pueden tratar de evitarla para no mezclarse con autobuses), el flujo de saturación correspondiente será menor y por lo tanto el flujo en esa pista no podrá combinarse con el de otra pista siguiendo la regla (iii).

4.4.2. Fases

Una fase es un estado de un semáforo en el cual uno o más movimientos reciben derecho de

paso. Las fases se definen de manera tal que cuando hay cambio en el derecho de paso (un movimiento se detiene y otro (s) parte (n)) hay un cambio de fase. Una fase se identifica por el dar derecho de paso al menos a un movimiento al principio de ella y el quitar derecho de paso al menos a un movimiento al final de la misma.

Si un movimiento recibe derecho de paso durante más de una fase, éste se llama un movimiento traslapado. La Fig. 4.10, muestra una intersección sencilla operando en tres fases (A, B, C).

Se han identificado en ella 4 movimientos siguiendo las reglas anteriores. El movimiento 1 es un movimiento traslapado o de traslazo, ya que recibe derecho de paso en las fases A y B. El resto son movimientos sencillos o no - traslapados.

Cabe hacer presente que dos de las pistas provenientes del oeste han sido agrupadas en el movimiento 1 y las dos pistas provenientes del este en el movimiento 3.

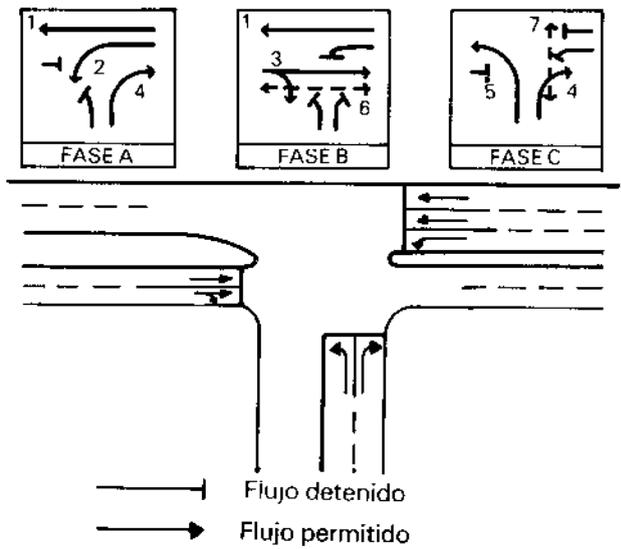


Fig. 4.10. EJEMPLO DE UN DIAGRAMA DE FASES Y PLANTA DE UNA INTERSECCION

Un sistema de fases puede describirse por una matriz de movimientos y fases. En esta matriz para cada movimiento se identifica la fase que inicia su derecho de paso y la fase que lo termina. Para el ejemplo, Fig. 4.10, esta matriz se presenta en el cuadro.

MATRIZ DE FASES Y MOVIMIENTOS CUADRO E

Movimiento	Fase de inicio	Fase de término
1	A	C
2	A	B
3	B	C
4	C	B

El diseño de un sistema de fases depende del diseño geométrico de la intersección (el número de calzadas y su relación física) y la cantidad de virajes, en especial a la izquierda. El objetivo del diseño de fases es minimizar accidentes (mediante la reducción de problemas entre los movimientos), y maximizar la eficiencia operativa de la intersección reduciendo demoras, colas, detenciones, etc...

Dos tipos de problemas son de importancia en una intersección: los problemas de cruce y los de entrelace o enlace. Los problemas de cruce son en general más peligrosos y deben evitarse en una fase. Sólo cuando los virajes a la izquierda son pequeños puede aceptarse la existencia de problemas de cruce durante una fase. El evitar totalmente los problemas de cruce en una intersección puede requerir un número demasiado grande de fases, y no operar eficientemente en términos de demoras. No pueden entregarse reglas rígidas para la eliminación de problemas. El ingeniero o diseñador deberá usar su juicio y experiencia para escoger el esquema de fases que mejor combine seguridad y eficiencia en cada caso.

4.4.2.1. Virajes

Un aspecto importante del diseño de fases es el tratamiento que se dé a los virajes, ya sea obstaculizado (generalmente a la izquierda o a la derecha con fuerte flujo peatonal cruzado) o libres. Las fases que permiten virajes obstaculizados resuelven los problemas mediante reglas de prioridad, por ejemplo, el vehículo que vira a la izquier-

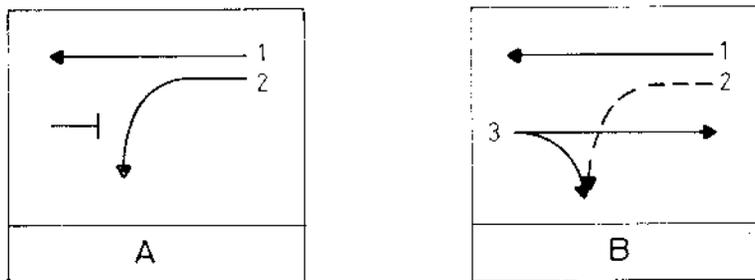
da cede el paso al vehículo que viniendo de la calzada opuesta sigue derecho.

El permitir virajes obstaculizados en una fase es una solución eficiente si se utiliza cuando los requerimientos básicos de capacidad se satisfacen. Esto ocurre cuando hay suficientes intervalos en el flujo obstaculizador como para permitir los virajes, y hay suficiente espacio para albergar a la cola de los vehículos que desean virar mientras esperan para aprovechar estos intervalos. Al mismo tiempo se requiere que se cumplan algunos requisitos de seguridad básica, como ser suficiente visibilidad, distancia de cruzamiento aceptable (generalmente no más de 2 pistas), velocidades razonables. Si estas condiciones no se cumplen será necesario permitir sólo virajes libres y controlar los virajes problemáticos mediante fases especiales.

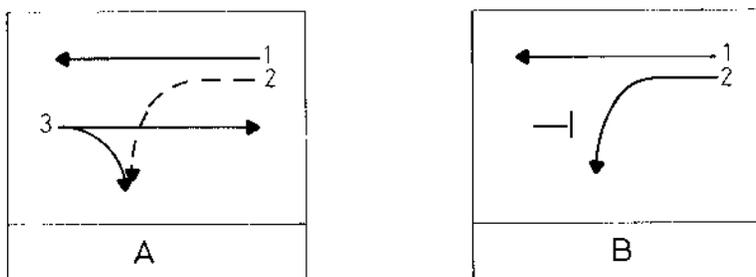
En algunos casos, un movimiento problemático (viraje a la izquierda) puede hacer uso de dos fases, una en que el viraje no está obstaculizado y otra en que lo está. Esto puede lograrse en la práctica de dos maneras. En el primer caso se da el paso a los vehículos que viran *antes* que al movimiento que los obstaculizaría. Esta modalidad de viraje primero o viraje adelantado se conoce también como liberación retrasada, en este caso, referida al movimiento obstaculizador.

La segunda opción consiste en detener el movimiento obstaculizador primero y permitir que el viraje continúe por un tiempo. En este caso, esta segunda fase puede llamarse de detención adelantada o viraje atrasado. Ambos sistemas se presentan en Fig. 4.11.

a) viraje adelantado (verde retrasado del movimiento obstaculizador)



b) viraje retrasado (detención adelantada del movimiento obstaculizador)



— Movimiento
 - - - - - Movimiento obstaculizado

Fig. 4.11. CONFIGURACIONES TRADICIONALES DE FASES PARA VIRAJE ADELANTADO Y VIRAJE RETRASADO EN UNA INTERSECCION EN T.

Estas dos modalidades tienen ventajas y desventajas.

El sistema de viraje primero o viraje adelantado puede no ser eficiente si muchos vehículos desean virar a la izquierda en la fase siguiente y no pueden hacerlo debido a la ausencia de intervalos en el movimiento obstaculizador. Estos tendrán que esperar casi un ciclo completo para poder virar. Con el sistema de viraje atrasado/detención adelantada,

este problema no se produce, pero hay un riesgo mayor de accidentes en intersecciones en cruz donde hay dos virajes opuestos a la izquierda. En este caso es conveniente detener los dos movimientos de giro y permitir sólo los virajes en la fase detención adelantada. Ver Fig. 4.12. Este esquema se llama a veces viraje en diamante.

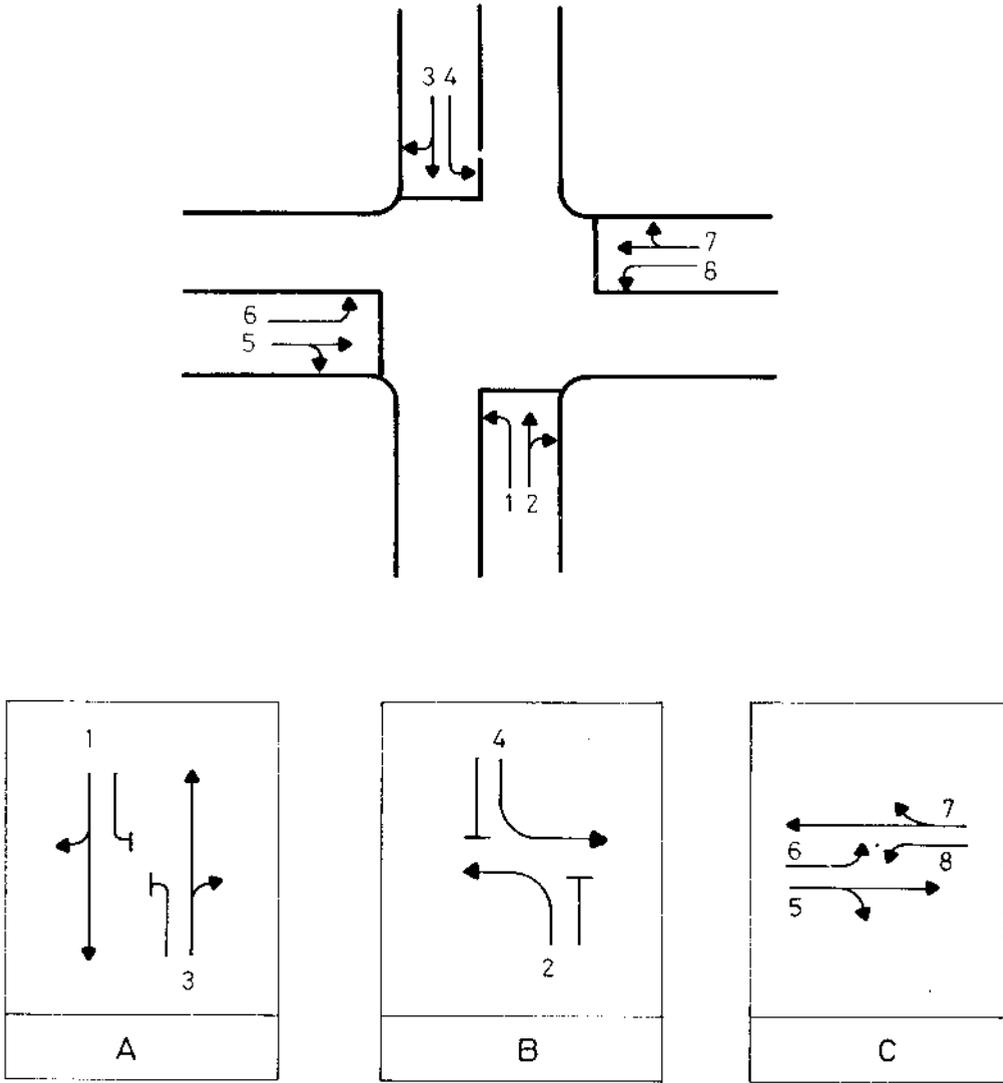


Fig. 4.12. UNA INTERSECCION EN QUE TODOS LOS MOVIMIENTOS A LA IZQUIERDA SE CONTROLAN SEPARADAMENTE

4.4.2.2. Prohibición de virajes a la izquierda

En general son los virajes a la izquierda los que generan la mayor cantidad de problemas en una intersección. Estos problemas son más graves si los virajes se ven obstaculizados por vehículos que siguen derecho en la dirección contraria o por peatones que cruzan la calzada lateral.

Normalmente en estos casos se prohíben los virajes a la izquierda. Sin embargo, es necesario considerar qué rutas usarán los vehículos que antes viraban a la izquierda, presentándose los siguientes casos:

- No hay alternativa, dado que hay restricciones a virar a la izquierda en las intersecciones vecinas y no hay rutas que requieran sólo virajes a la derecha.
Las rutas alternativas se basan en virajes a la izquierda en otras intersecciones en cuyo caso sólo se ha trasladado el problema sin resolverlo.
- Las rutas alternativas se basan en virajes a la derecha. En este caso es probable que la nueva ruta sea bastante más larga que la anterior y por lo tanto aumente el consumo de combustible y contaminantes.
Además es probable que pase por zonas residenciales las que se vean perjudicadas por el aumento de los flujos (y accidentes).

Para estos casos es recomendable estudiar soluciones que no prohiban el viraje a la izquierda, tales como:

- alargar la duración del ciclo e introducir fase (s) especial (es) para virajes
considerar el reemplazo del semáforo por una rotonda de diámetro pequeño

- considerar un grupo de intersecciones vecinas y modificarlas de modo que se permitan rutas más razonables.
- estudiar si es posible ensanchar las calzadas, de modo de aumentar el número de pistas y permitir la acumulación de vehículos que desean virar en espera de la fase correspondiente.

En general, no conviene prohibir virajes a la izquierda si la ruta alternativa requiere que el vehículo pase dos veces por la misma intersección. Esto ocurre cuando se lleva al vehículo a realizar un movimiento en el que pasa por la misma intersección primero en una dirección y luego de virar 3 veces a la derecha pasa por la intersección misma.

4.4.3. Ciclos

El ciclo de un semáforo es la secuencia completa de sus fases. Una manera útil de representar un ciclo es mediante un diagrama como en la figura 4.13.

El tiempo que transcurre entre el fin del período verde de una fase y el comienzo del verde de la fase siguiente se llama entreverde (E). Este consiste del período amarillo y de un período todo rojo.

Es costumbre identificar el comienzo y final de cada fase mediante los **tiempos de cambio de fase**. En general, el momento más claro a definir es el fin de una fase cuando un período verde cambia a amarillo. Este tiempo (F) coincide necesariamente con el tiempo al cual la fase siguiente comienza (F). El tiempo entreverde (E) se define entonces como perteneciente a la fase que acabe de comenzar, ver Fig. 4.14. Si el superíndice 1 ó 2 se omite, se supone que se trata del comienzo de la fase correspondiente.

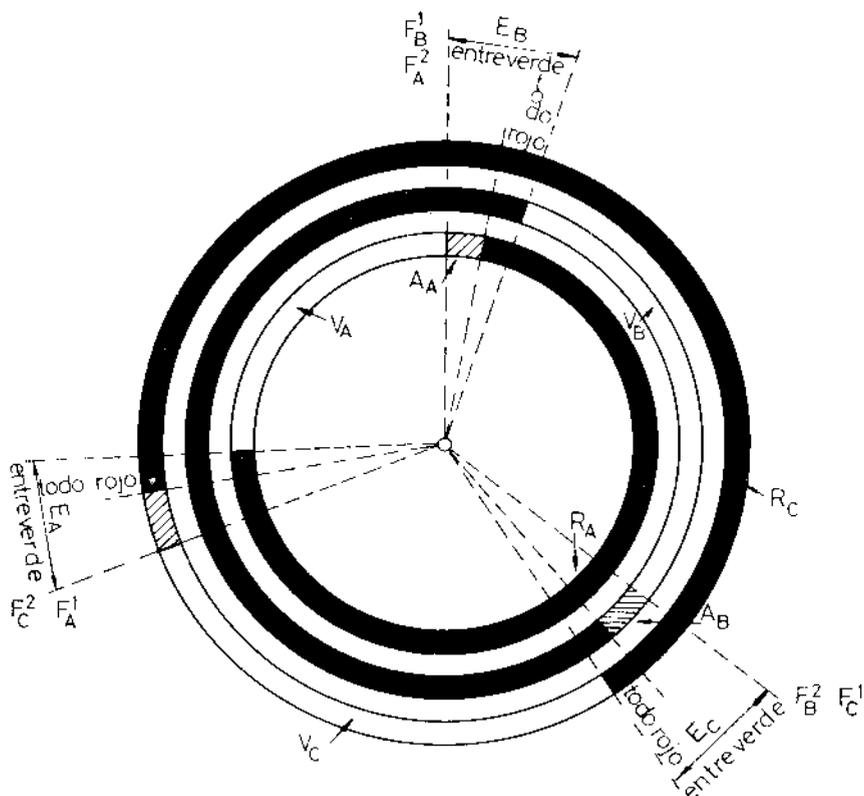


Fig. 4.13. DIAGRAMA DE CICLO Y FASES.

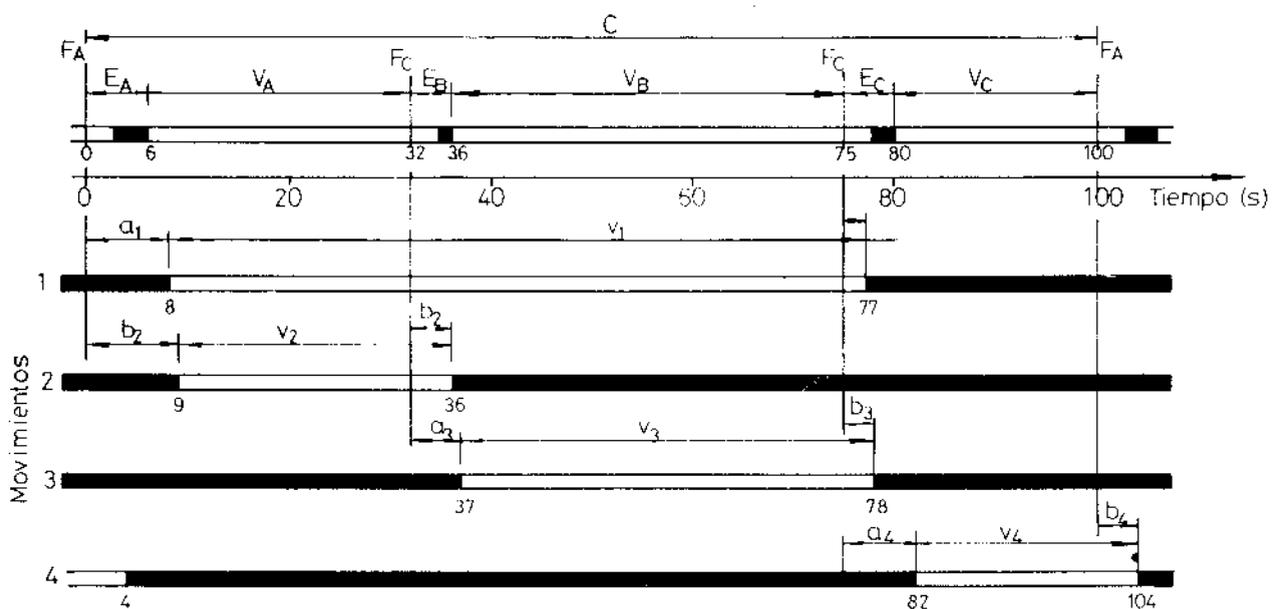


Fig. 4.14. DIAGRAMA DE TIEMPOS PARA EJEMPLO

Una fracción de un ciclo completo no tendrá ningún período en verde, presentado ya sea amarillo o todo rojo (en otras palabras entreverde). El tiempo total de entreverde en un ciclo se puede representar por la letra E sin subíndice. Si el verde presentado por una fase i es v_i , esta fase termina en el instante.

$$F_1^1 = F_2^2 + E_i + v_i \quad (433.1)$$

El diagrama de ciclo y fase puede construirse dando arbitrariamente el valor cero al comienzo del cambio de fase A.

La duración del ciclo está dada por

$$C = \sum_i (E_i + v_i) \quad (433.2)$$

es decir, la suma de todos los períodos de entreverde y de verde presentado.

4.4.4. Análisis de un movimiento

Se presenta aquí una descripción más detallada de los elementos más importantes de un movimiento.

i) Flujo de saturación y verde efectivo

El modelo básico supone que cuando un período cambia a verde el flujo a través de la línea de detención aumenta rápidamente hasta alcanzar un nivel llamado **flujo de saturación S**. Este nivel permanece constante hasta que la cola que afectaba al movimiento correspondiente desaparezca, o hasta el fin del período verde si la fase se encontraba saturada. La tasa de partida o flujo unitario es menor al comienzo del período verde ya que algunos vehículos tardan en acelerar. Al mismo tiempo, al final del período verde algunos vehículos tardan en reaccionar y utilizan parte del amarillo y aún rojo.

El flujo de saturación entonces es el máximo flujo que puede obtenerse cuando hay una cola. La figura 4.15 presenta un período verde saturado.

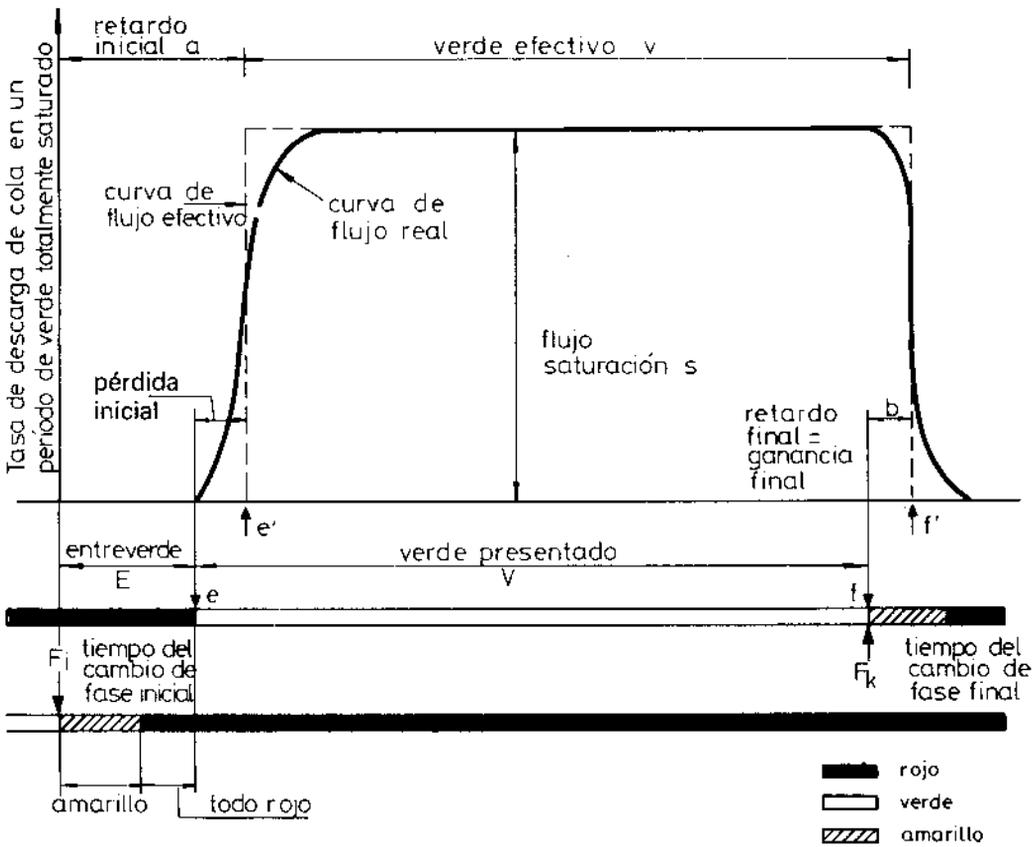


Fig. 4.15. MODELO BASICO Y DEFINICIONES

Como lo indica la línea de puntos el modelo básico reemplaza los flujos reales por un flujo equivalente. Este corresponde a un rectángulo cuya altura corresponde al flujo de saturación s_i v_i del rectángulo correspondiente.

El tiempo que transcurre entre el comienzo del verde mostrado y el comienzo del verde efectivo (ee') se llama pérdida inicial. El tiempo que transcurre entre el fin del verde mostrado y el fin del verde efectivo se llama ganancia final (ff'). De esta manera el verde efectivo para un movimiento es igual al verde mostrado más la ganancia final y menos la pérdida inicial.

$$v_i = v_i + ff' - ee' \quad (444.1)$$

ii) Retrasos iniciales y finales

Hay que tener en cuenta que en el diseño de un ciclo óptimo son los verdes efectivos y no los verdes mostrados los que se toman en cuenta. Por supuesto existe una relación estrecha entre unos y otros y por ello es conveniente discutir su determinación en función de ciertos puntos de referencia. A esta altura vale la pena tener en cuenta los requerimientos de sistemas de semáforos coordinados. Por ello se han adoptado definiciones que son compatibles con estos requerimientos y que permitirán una transición fácil. Las definiciones que siguen se basan en los tiempos de cambio de fase F.

Se define como retraso inicial (a) a la suma del entreverde del movimiento y su pérdida inicial ($a = E_i + ee'$). Se define como retraso final a la ganancia final ($b = ff'$). De acuerdo con estas definiciones el comienzo y fin del verde efectivo vienen dados por $F_1 + a$ y $F_2 + b$. En general $a \geq b$ debido a la importancia del entreverde.

iii) Tiempo desaprovechado de un movimiento

El tiempo desaprovechado o perdido de un movimiento se define como la diferencia entre los retrasos iniciales y finales.

$$l_i = a_i - b_i \quad (444.2)$$

Por ello, el tiempo perdido de un movimiento es igual al entreverde más la pérdida inicial menos la ganancia final. A menudo puede suponerse que la pérdida inicial y la ganancia final son aproximadamente iguales. En ese caso el tiempo perdido es igual al entreverde correspondiente. Para intersec-

ciones que no son simples es necesario considerar estas ganancias y pérdidas explícitamente. En general

$$v_i + l_i = V_i + E_i \quad (444.3)$$

iv) Entreverde

El valor del período entreverde debe permitir a los vehículos despejar la intersección. Por ello el entreverde debe depender del ancho de la intersección y de la velocidad de los vehículos que la usan. El rango normal del entreverde es entre 4 y 8 segundos. El mínimo debe estar compuesto de 3 segundos de amarillo y 1 de todo rojo.

Cuando una intersección requiere un entreverde mayor de 4 segundos éste puede alargarse mediante un amarillo más largo, un todo rojo más largo o una combinación de ambos (hasta un máximo de 8 segundos). El alargar el período amarillo puede tentar a conductores a continuar y por ello se recomienda que el alargamiento del entreverde se base, desde el punto de vista de la seguridad, en alargar fundamentalmente el período todo rojo.

El mínimo normal de 4 segundos para el entreverde es aplicable así:

- el ancho de la intersección es no mayor a 10 metros.
- si los virajes a la izquierda están prohibidos o cuentan con una fase especial.
- si los peatones no requieren un período totalmente libre de vehículos para cruzar con seguridad.

Si alguna de estas condiciones no se cumple, se puede estudiar el tiempo necesario para despejar la intersección de vehículos.

- Identificar primero los puntos de conflicto potencial. Por ejemplo en la Fig. 4.16. interesan solamente la suma de las distancias críticas para un riesgo de accidente. Al término del verde mostrado en la dirección Este - Oeste las distancias que interesan son AF - BF y CH - DH. Escoger la mayor de estas distancias para ese cambio de fase y agragar 1 segundo por cada 9 metros en exceso sobre el mínimo de 10 metros.

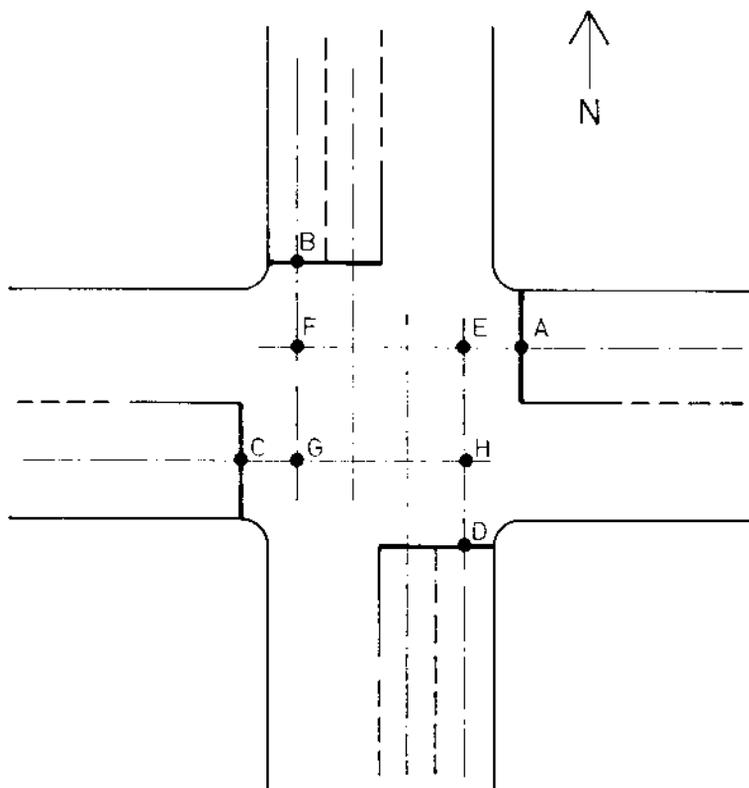


Fig. 4.16. ZONA DE PROBLEMAS POTENCIALES DE UN CAMBIO DE FASE

- Cuando las distancias críticas son muy grandes ($x > 30$ metros) o la velocidad de los vehículos es poco usual, se pueden usar con los valores recomendados en paréntesis, la siguiente fórmula:

$$E = t_p + 0.5 \mu / d + \left(\frac{x + l_v}{\mu} \right) \quad (444.4)$$

t_p = tiempo de reacción del conductor (1 seg.)

μ = velocidad del vehículo en metros por segundos.

d = desaceleración del vehículo (4.6 m/seg.²)

l_v = longitud típica del vehículo (6 m.)

Reemplazando los valores recomendados

$$E = 1 + 0.03 W + (3.6 x + 21.6) / W \quad (444.5)$$

donde W = velocidad del vehículo en Km/hr.

Por ejemplo:

$X = 40$ m.

$W = 35$ km/hr.

$$E = 1 + 0.03; 35 + (3.6; 40 + 21.6) / 35$$

$$E = 6.8 \text{ seg.}$$

- Uno o dos segundos extra de enterverde pueden ayudar a despejar la intersección de vehículos que tratan de virar a la izquierda.
- La mejor manera de calcular el período de enterverde es observar el tiempo que requieren los vehículos para despejar la intersección cuando hay un cambio de fase.

v) Movimientos críticos

En el diseño de los tiempos de un semáforo es importante otorgar a cada movimiento tiempo suficiente como para que en promedio toda la demanda de ese movimiento pueda pasar en cada ciclo. Por supuesto, es posible que debido a variaciones menores en el tiempo la cola correspondiente no pueda ser despejada en un número reducido de ciclos.

En cada intersección habrá ciertos movimientos que requieren mayor tiempo en las fases correspondientes. Estos movimientos se llaman movimientos críticos (o movimientos representativos). Si cada movimiento crítico recibe suficiente verde efectivo, entonces todos los movimientos tendrán suficiente capacidad y la intersección no estará saturada.

La identificación de los movimientos críticos es más sencilla si no hay movimientos traslapados (es decir que usen más de una fase). En este caso habrá un movimiento crítico o representativo por fase, y éste será aquel que requiera el tiempo mayor en la fase. El tiempo requerido por movimiento crítico viene dado por $(v_i + l_i)$, verde efectivo más tiempo perdido.

Cuando hay movimientos traslapados es necesario usar un diagrama de búsqueda del movimiento crítico, el cual se describe en el Anexo D.

4.4.5. Tiempo perdido de un ciclo

La duración de un ciclo puede calcularse como

$$C = \sum_{\text{crit}} (v_i + I_i) \quad (445.1)$$

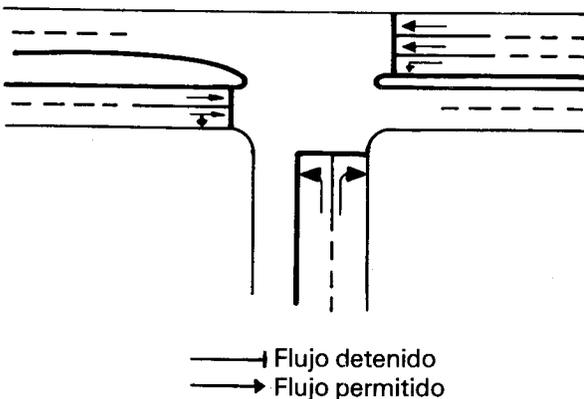
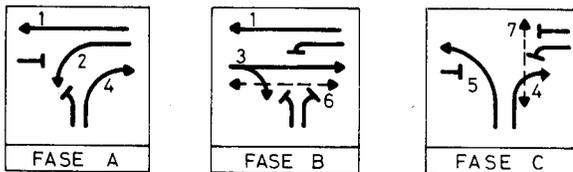
es decir, la suma de los tiempos requeridos por los movimientos críticos. De manera similar el tiempo total perdido por ciclo está dado por

$$L = \sum_i I_i \quad (445.2)$$

otra vez suma de tiempos perdido por movimiento crítico.

Es importante enfatizar que dada la estrategia de diseño adoptada en este Manual, el tiempo perdido total se refiere a la suma de los tiempos perdidos por movimiento crítico, y no necesariamente por fase (sería tiempo perdido por cambio de fase si hubiera un movimiento crítico por fase). Por ejemplo si en la intersección de la Fig. 4.17 los movimientos críticos son 1 y 4, el tiempo perdido total es $L = I_1 + I_4$ (excluye E_b); alternatively, si los movimientos críticos son 2, 3 y 4, entonces el tiempo perdido total $L = I_2 + I_3 + I_4$ incluye todos los entreverdes.

La determinación de los movimientos dependerá de los flujos de cada movimiento y de los flujos de saturación correspondiente.



4.17 EJEMPLO DE UN DIAGRAMA DE FASES Y PLANTA DE UNA INTERSECCION.

4.4.6. Capacidades y tasas de saturación

4.4.6.1. Capacidad de un movimiento

La capacidad de un movimiento depende fundamentalmente del flujo de saturación correspondiente s_i y de la proporción del ciclo que ofrece verde efectivo a ese movimiento. Entonces la capacidad Q_i es:

$$Q_i = S_i \cdot v_i / C \quad (446.1)$$

La proporción de tiempo de un ciclo que ofrece verde efectivo al movimiento es:

$$u_i = v_i / C \quad (446.2)$$

y se llama tasa de verde efectivo. Otro indicador útil en la descripción de un movimiento es la tasa de flujo del movimiento.

$$y_i = q_i / s_i \quad (446.3)$$

donde q_i es la demanda o flujo correspondiente al movimiento en cuestión.

La tasa o grado (x) de saturación del movimiento es el cociente entre flujo de llegada y capacidad

$$x_i = q_i / Q_i = q_i C / s_i v_i = y_i / u_i \quad (446.4)$$

La tasa de flujo puede considerarse como una constante que representa la demanda, mientras que la tasa de verde efectivo "u" es un parámetro de control que representa la oferta. El grado de saturación es la tasa que relaciona ambos valores.

Es necesario diseñar de manera que

$$Q_i > q_i \text{ o } x_i < 1 \text{ para todo movimiento } i$$

es decir $s_i v_i > q_i C$ o $u_i > y_i$ (446.5)

Es siempre posible aumentar la capacidad de un movimiento mediante un aumento de la tasa de verde efectivo que se le asigna. Este mejoramiento, sin embargo, requiere disminuir la tasa verde efectivo de aquellos movimientos que no tienen derecho de paso al mismo tiempo.

4.4.6.2. Capacidad de una intersección

Si las tasas de verde efectivo y las tasas de flujo se suman para todos los movimientos críticos se tendrá

$$U = \sum_{\text{crit}} u_i > \sum_{\text{crit}} y_i = Y \quad (446.6)$$

donde

U = tasa de verde efectivo para la intersección
 Y = tasa de flujo para la intersección

$$\text{también } U = (C - L) / C \quad (446.7)$$

El grado de saturación de la intersección X se define como el grado de saturación máximo entre los movimientos (críticos) de una intersección.

Una estrategia común en el diseño de semáforos es adoptar el mínimo grado de saturación posible para una intersección. Es fácil ver que esto requiere adoptar una solución en que los grados de saturación de cada movimiento crítico son iguales

$$x_1 = x_2 = x_3 \dots\dots\dots = X \quad (446.8)$$

El grado de saturación de una intersección puede calcularse sin necesidad de calcular tiempos de verde

$$X = Y \cdot c / (C - L) \quad (446.9)$$

Ya que X se ha definido como el máximo de los grados de saturación de cada movimiento la condición $X \leq 1$ satisface también la condición $x_i \leq 1$ para cada movimiento crítico. Si estas condiciones no se cumplen la intersección se encontrará sobresaturada y las colas correspondientes crecerán ciclo tras ciclo. Es obvio que estas condiciones son sólo aceptables por períodos cortos y en general no pueden considerarse en un nuevo diseño.

4.4.6.3. Grado práctico de saturación

No se acostumbra a diseñar una intersección con un grado de saturación igual a 1.0 en su cercanía inmediata. Una intersección en esa situación operará en forma muy inestable. Pequeñas variaciones en los flujos producirán condiciones de sobresaturación. Sobresaturación se presentará también si hay situaciones que disminuyen la capacidad del semáforo, por ejemplo un vehículo detenido por unos minutos, un accidente, etc.

Como una manera de evitar estas condiciones inestables se adopta generalmente un grado práctico de saturación x_p entre 0.8 y 0.9

Este Manual recomienda usar un valor $x_p = 0.9$, siempre que:

- el período de diseño ha sido elegido adecuadamente y considera el crecimiento esperado de la demanda.
- se plantea poner al día el diseño del semáforo dentro del plazo recomendado (2 años).
- las características de demanda de la hora de demanda máxima no sean excepcionales. Por ejemplo si se sabe que existe un período de 20 minutos dentro de dicha hora en que el flujo es excepcionalmente alto, conviene tomar como norma de diseño un grado de saturación de 0.85 o aún 0.8.
- si hay muchas limitaciones puede usarse $x_p = 0.95$, como máximo absoluto para diseñar en condiciones no saturadas.

4.5. FLUJOS DE SATURACION

Los flujos de saturación deben medirse en vehículos reales por hora y no automóviles directos equivalentes.

Se recomienda que los flujos de saturación se obtengan experimentalmente usando la técnica descrita en el anexo D. Si esto no es posible la sección 4.2.2. describe un método general para estimar flujos de saturación a partir de valores estándar para los Automóviles Directos Equivalentes (ADE) que corresponden a diferentes condiciones de una intersección. Las recomendaciones de esa sección 4.2.2. son aplicables a la gran mayoría de las intersecciones. El resto de esta sección está destinado a discutir algunas condiciones que podrían presentarse en intersecciones excepcionales.

4.5.1. Virajes obstaculizados

El cuadro 4 C presenta los Automóviles Directos Equivalentes (ADE) para virajes e_j . Estos valores son válidos como una primera aproximación en el caso de virajes obstaculizados. Estos virajes se presentan en los siguientes casos:

- virajes a la izquierda obstaculizados por vehículos que siguen derecho en la dirección opuesta.
- virajes a la derecha o izquierda obstaculizados por peatones con derecho de paso.
- virajes a la izquierda bajo la condición vire a izquierda con luz roja y sin prioridad.

En cada caso los vehículos que viran se filtran a través de los claros en el flujo obstaculizador. La existencia de estos claros dependerá en general de la existencia del flujo no saturado en el movimiento obstaculizador.

i) Pista compartida

En este caso los vehículos que viran obstaculizados comparten la misma pista con otros vehículos que no están obstaculizados. El nuevo valor e_j se calcula de

$$e_j = \frac{0.5 v_i}{s_u \cdot v_u + n_f} \quad (451.1)$$

donde

- e_j = Automóviles Directos Equivalentes
- v_i = verde efectivo para movimiento obstaculizado (Seg.)
- s_u = flujo de saturación para el viraje, éste se obtiene de la Fig. 4.18 como función del flujo obstaculizador en la parte no saturada de su movimiento (veh/seg)
- v_u = parte no saturada del movimiento obstaculizador (seg.). Se obtiene de la ecuación (551.2).
- $s_u \cdot v_u$ = número de vehículos (por ciclo) que pueden virar durante el período v_u .

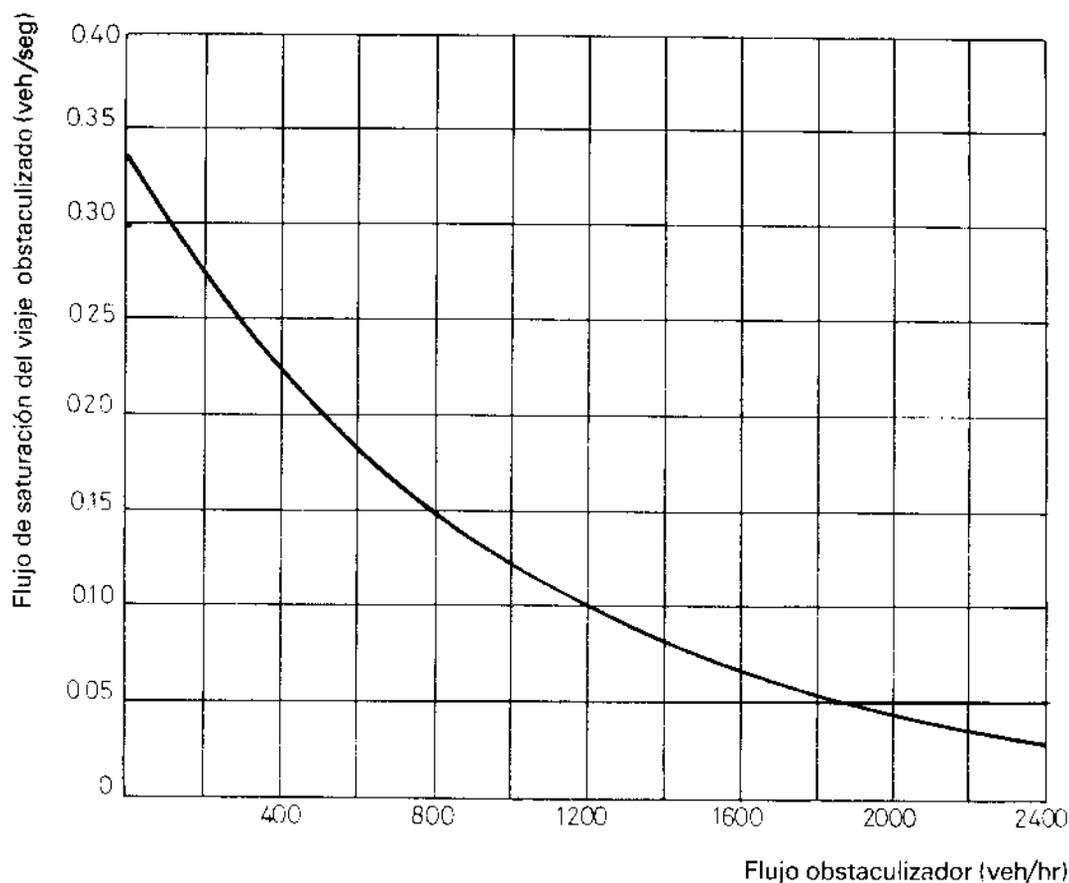


Fig. 4.18. FLUJO DE SATURACION DE VIRAJE OBSTACULIZADO.

n_f = número de vehículos (por ciclo) que pueden virar durante el período de entreverde que sigue el final de la fase correspondiente.

La constante 0.5 es una aproximación al flujo básico de saturación en ADAS (0.5 ADA seg. = 1800 ADA/h.)

La parte no-saturada de un movimiento obstaculizador se puede calcular de

$$v_u = \frac{sv - qc}{s - q} \quad (451.2)$$

donde q = flujo en veh/seg
 s = saturación de flujo (veh/seg)
 v = verde efectivo (seg)
 c = duración del ciclo (seg)

} Para el movimiento obstaculizado

La ecuación (451.2) es sólo válida para movimientos no saturados, es decir $sv > qc$ o $x < 1$. Si el movimiento está saturado considérese $v_u = 0$.

Cabe señalar que el verde efectivo v en este caso no es necesariamente igual al verde efectivo del movimiento obstaculizado debido a que: a) los

tiempos perdidos pueden ser diferentes, o b) el movimiento obstaculizado puede ser traslapado.

El valor n_f puede medirse con facilidad en terreno y tiene bastante importancia cuando el movimiento obstaculizador se acerca a los niveles de saturación. Como una primera aproximación solamente puede usarse el valor $n_f = 1.5$ veh/ciclo. Si el movimiento obstaculizante es traslapado puede ser que el valor más realista sea $n_f = 0$.

Cuando exista más de un movimiento obstaculizador es necesario considerar aquel que sea más crítico, es decir v_u menor, en los cálculos. Sin embargo, s_u debe calcularse como la suma de los dos flujos obstaculizadores.

ii) Pista exclusiva

El método en este caso es análogo al anterior, ya que el coeficiente e_i puede calcularse de las ecuaciones (451.1) y (451.2)

Alternativamente el flujo de saturación para el viraje obstaculizado puede leerse de la Fig. 4.18 y el verde efectivo para ese movimiento se calcula como:

$$V_o = v_u + (n_f/s_u) \quad (451.3)$$

El tiempo perdido correspondiente a usarse en la identificación de movimientos críticos y el cálculo de fases es:

$$I_o = (V + E) - v_o \quad (451.4)$$

donde $(V + E)$ es la suma de verde mostrado y enterverde para el movimiento obstaculizador.

iii) Cálculos iterativos

Las ecuaciones (451.1) y (451.2) indican que el flujo de saturación para movimientos obstaculizados depende de la duración de las fases del semáforo, las que a su vez dependen de los flujos de saturación, incluyendo el del viraje obstaculizado. Esto requiere que el cálculo del semáforo se realice en forma iterativa y por aproximaciones sucesivas.

Se recomienda que como una primera aproximación se parta suponiendo que ningún viraje es obstaculizado por otros movimientos. Esto facilitará un primer cálculo de ciclos y fases los que a su vez permitirán un cálculo de las características de los virajes obstaculizados. Este cálculo permitirá una nueva estimación de ciclos y fases. Los cálculos deberán repetirse hasta que no se produzcan diferencias mayores en dos iteraciones sucesivas.

Si los virajes obstaculizados son una proporción pequeña del movimiento en una pista compartida se puede usar directamente los valores del Cuadro 4 C ya que e_j no variará mayormente.

4.5.2. Utilización de pistas

Es posible que no todas las pistas de una calza-

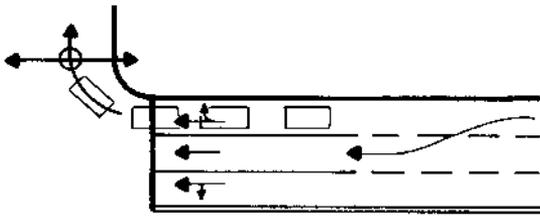
da de pistas múltiples estén igualmente bien utilizadas. La sub-utilización de una o más pistas tiene importancia en el cálculo de un semáforo. Es conveniente tomar medidas para evitar la sub-utilización de pistas cuando esto sea posible.

En general los conductores escogerán pistas en una intersección tomando en cuenta:

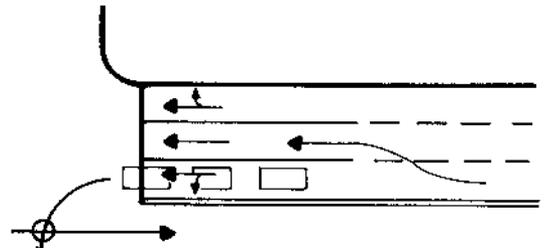
- i) El destino o salida de la intersección que interesa al conductor. Esto se refleja en la elección de pistas para viraje o paso directo.
- ii) La demora que el conductor estime que incurrirá si elige una pista en particular. Esta dependerá del largo y composición de la cola (Vehículos pesados, virajes obstaculizados) y de la interferencia generada por vehículos estacionados, paraderos del transporte público, etc.

Es muy importante, cuando se sospeche la existencia de sub-utilización de pistas, el hacer observaciones directas en terreno. La Fig. 4.19. presenta algunos casos comunes en que puede producirse esta sub-utilización.

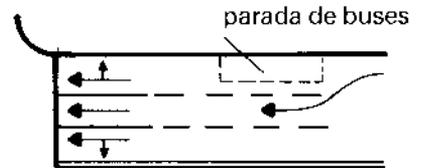
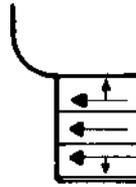
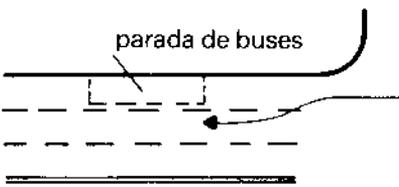
El método recomendado por este Manual en el caso de sub-utilización de pistas es el describir el tránsito asociado a esa pista como un movimiento independiente. Esto requiere conocer los flujos por pista en la intersección, al menos para el caso de la calzada que contiene la pista sub-utilizada.



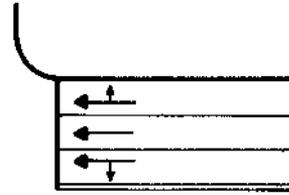
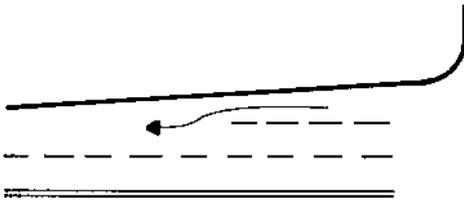
a) VIRAJE A LA DERECHA OBSTACULIZADO POR PEATONES



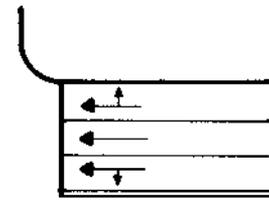
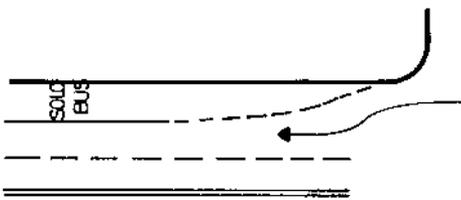
b) VIRAJE A LA IZQUIERDA OBSTACULIZADO POR OTROS VEHICULOS



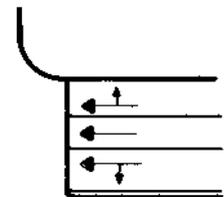
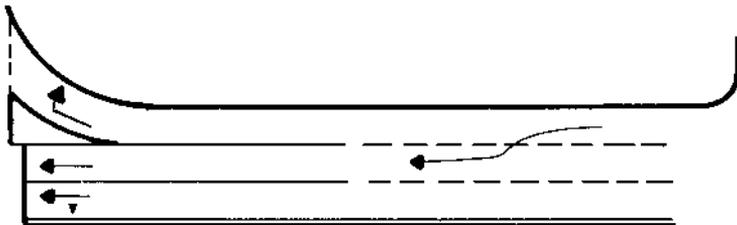
c) PARADA DE BUSES EN LAS CERCANIAS DE INTERSECCION



d) PERDIDA DE PISTA EN LA CALZADA DE SALIDA



e) PISTA SOLO BUS A LA SALIDA



f) PISTA EXCLUSIVA PARA VIRAJES EN LA INTERSECCION SIGUIENTES

Fig. 4.19. VARIOS CASOS EN QUE ES POSIBLE ENCONTRAR SUBUTILIZACION DE PISTAS.

En estas intersecciones el flujo de saturación del grupo de pistas será inicialmente alto para disminuir una vez que la cola de vehículos acumulados en la pista corta se haya despejado.

Si el espacio para acumular vehículos en la pista

corta es suficientemente grande, esta disminución del flujo de saturación puede no ocurrir.

El modelo idealizado correspondiente al caso en que hay una disminución del flujo de saturación se presenta en Fig. 4.20.

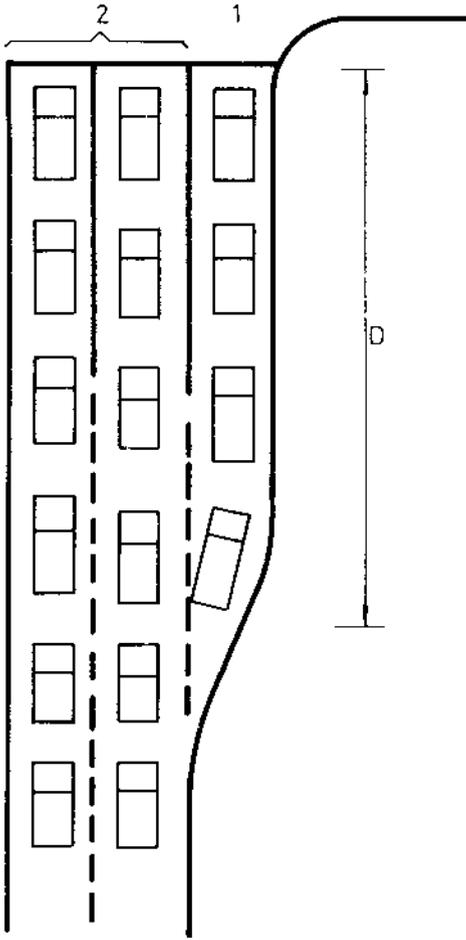


Fig. 4.20.1. COLAS EN SITUACION DE PISTAS CORTAS.

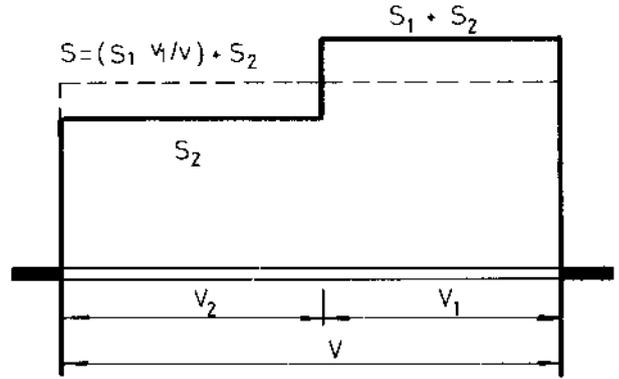


Fig. 4.20.2 FLUJO SATURACION DE PISTAS CORTAS.

4.5.3. Flujos de saturación de pistas cortas

Una medida que puede tomarse para aumentar la capacidad de una intersección es el agregar una pista adicional en una calzada. Esta pista adicional normalmente será corta, por ejemplo para acumular vehículos que deseen virar a la izquierda.

La Fig. 4.21 presenta alguno de estos casos.

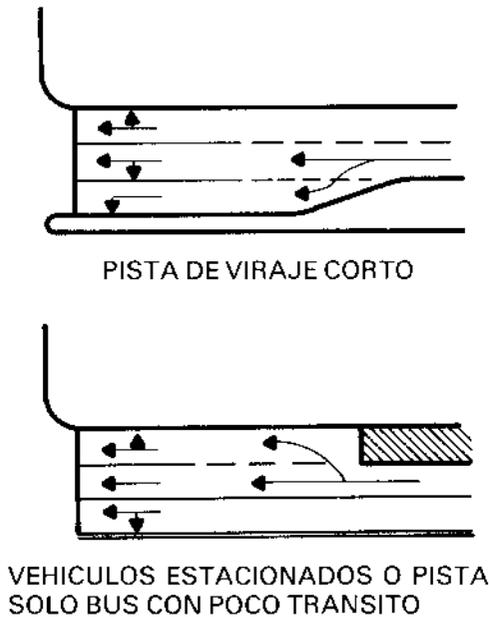


Fig. 4.21. PISTAS CORTAS DEBIDO A GEOMETRIA DE INTERSECCION

El número de vehículos que pueden acumularse en la pista corta se puede calcular aproximadamente como:

$$n = \frac{D}{R} \quad (453.1)$$

$$R = 6 \cdot p_e + 12 p_p \text{ (m)} \quad (453.2)$$

R = es el largo promedio ocupado por un vehículo

p_e y p_p = son la proporción de vehículos livianos y pesados, respectivamente.

D = distancia de pista corta en m.

El aporte que la pista corta hace al flujo de saturación total es:

$$s_c = n/v \quad (453.3)$$

donde v es el verde efectivo correspondiente.

El flujo de saturación total es entonces:

$$s = s_c + s_r \quad (453.4)$$

donde s_r es el flujo de saturación del resto de las pistas.

4.5.4. Bloqueo de Pistas

En algunos casos la cola de una pista adyacente puede bloquear el uso del largo total de una pista. Dos casos se ilustran en la Fig. 4.22.



Fig. 4.22. BLOQUEO DE PISTAS

En general los dos casos presentados en Fig. 4.22 pueden tratarse como pistas cortas considerando las características particulares de cada situación. Por ejemplo el largo efectivo de la pista de viraje en el segundo caso se debe calcular como:

$$D = (q_1 / q_2) D' \quad (454.1)$$

donde

D' = largo físico de la pista de viraje

q_1 = tasa de llegada del flujo con viraje

q_2 = tasa de llegada en la pista adyacente

En ambos casos se puede tratar de modificar ligeramente las fases de modo de reducir el problema. Por ejemplo, una partida adelantada o detención retrasada del movimiento que bloquea a la pista en cuestión.

4.5.5. Otros problemas

- i) Peatones. Si el flujo de peatones es muy grande, puede utilizarse la técnica usada para los virajes obstaculizados. En este caso se recomienda obtener los parámetros críticos en terreno.
- ii) Estado del tiempo y hora del día. Se ha observado que en condiciones de oscuridad los flujos de saturación disminuyen en aproximadamente 100 ADCS por pista. Lo mismo ocurre en días lluviosos. Se

ha observado también que en períodos de poca demanda los flujos de saturación son del orden de 150 ADC menos que en períodos de máxima demanda.

Los valores anteriores se dan a título de referencia, siendo recomendable su determinación para cada situación.

4.6. MEDIDAS DE RENDIMIENTO DEL DISEÑO

Al diseñar una intersección controlada por semáforos interesa obtener algunos indicadores o medidas del rendimiento del mismo. De esa manera puede establecerse qué diseño es más adecuado o tiene mejor rendimiento, desde un punto de vista particular. Se ha discutido ya en la sección 4.1.1. los distintos objetivos generales que pueden perseguirse en el diseño de una intersección. En esta sección se presentan las medidas de rendimiento (o indicadores de comportamiento) más importantes a emplearse en la evaluación de diseños.

La medida que se emplea más comúnmente en el diseño de semáforos es la **demora** a vehículos y usuarios de los mismos. Esta demora corresponde a la diferencia entre el tiempo que tomaría un vehículo atravesar la intersección en ausencia de otros vehículos (sin detenerse) y el tiempo que toma atravesarla cuando el semáforo se encuentra en operación. En esta forma las demoras incluyen el efecto del frenado y aceleración de los vehículos además del tiempo durante el cual éste se encuentra detenido. En algunos casos un vehículo puede disminuir la velocidad y luego aumentarla sin haberse detenido en forma completa. Esta demora se llama **detención parcial**. De lo contrario, el vehículo deberá sufrir una detención completa. El número de detenciones completas se encuentra generalmente asociado al consumo de combustible y a la emisión de contaminantes (ruidos, contaminación del aire). **Consumo de combustibles** y **emisiones contaminantes** son dos indicadores secundarios del funcionamiento de una intersección controlada por semáforos.

Otro indicador importante (primario) es la **longitud media de las colas** generadas en las calzadas. Este indicador es importante al menos en dos sentidos.

- i) Es un indicador de fácil verificación y da una idea visual del nivel de servicio ofrecido por un diseño particular.
- ii) En casos de alta congestión es necesario verificar que las colas generadas en las arterias no crezcan tanto que obstaculicen el funcionamiento de otras intersecciones cercanas.

Por último existen algunos indicadores que forman parte del cálculo de los tiempos de un semáforo y que proporcionan una idea básica del nivel de servicio ofrecido. Los más importantes son la **capacidad de reserva** y el **grado de saturación**.

4.6.1. Demoras

La fórmula que se usará para la demora de una corriente es

$$d_i = 0.9 \left(\frac{c(1-u_i)^2}{2(1-y_i)} + \frac{1.800 x_i^2}{q_i(1-x_i)} \right) \quad (461.1)$$

donde

d_i = demora promedio por vehículo en la corriente (seg.).

c = duración del ciclo (seg.)

u_i = razón de tiempos de verde para esa corriente

$$\frac{(v_i)}{c}$$

y_i = razón de flujo para la corriente (q_i/s_i)

x_i = grado o tasa de saturación ($c q_i/v_i s_i$)

Esta fórmula nos entrega una estimación de la demora por vehículo en una corriente. La demora total de todos los vehículos de una corriente viene dada por

$$D_i = q_i d_i \quad (461.2)$$

La Fig. 4.23 muestra cómo varía la demora de un vehículo con el nivel de flujo de la corriente correspondiente. Como puede observarse, las demoras crecen rápidamente cuando los flujos se acercan a la capacidad última de la corriente.

En general se utiliza la **demora media** como indicador del comportamiento de una intersección. Sin embargo, debido a variaciones de los flujos en cortos períodos los usuarios percibirán a veces demoras mayores y menores a esta demora media.

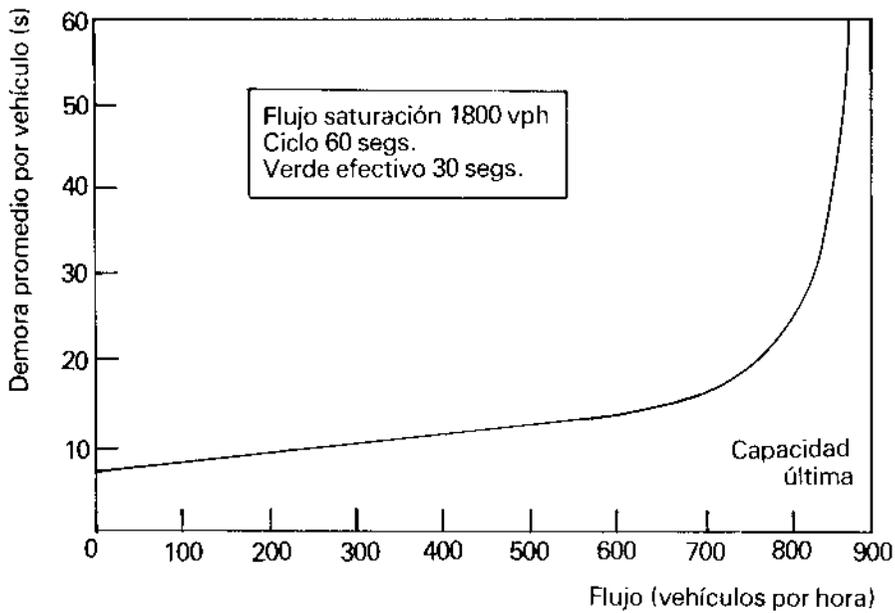


Fig. 4.23. CURVA DE DEMORAS CONTRA FLUJO PARA UN MOVIMIENTO EN UNA INTERSECCION TIPICA

4.6.2. Largo de las colas

Al igual que las demoras, las colas deben calcularse para las corrientes identificadas en la intersección.

El número medio de vehículos en una cola al comienzo de un período verde puede estimarse como,

$$N = \frac{q_i (r_i + d_i)}{2} \quad (462.1)$$

en que:

N = largo teórico de la cola (en vehículos)

r_i = $c - v_i$ o sea el rojo efectivo a la corriente i

q_i = flujo de la corriente i (veh./seg.)

d_i = demora promedio al vehículo de la corriente i .

Esta ecuación está basada en el supuesto que los vehículos se incorporan a la cola en la línea de detención. En la práctica, los vehículos se unen al final de la cola y por lo tanto lo hacen antes que en 462.1. La siguiente ecuación corrige por ese efecto

$$N' = \frac{N}{1 - (j/v)q_p} \quad (462.2)$$

en que

N' = Total vehículos al final de la cola (vehículos)

j = espacio en la cola ocupado por un vehículo (típicamente alrededor de 7 metros)

v = velocidad promedio libre en m/seg. (a menudo 14 m/seg, es decir 50 km/hr. aprox.). De esta manera un valor común es $(j/v) = 0.5$

q_p = flujo vehicular por pista (flujo total del movimiento o corriente dividido por el número de pistas correspondientes).

Si esta información no se encuentra disponible puede usarse

$$N' = 1.1 N \quad (462.3)$$

como una primera aproximación

A menudo interesa no sólo determinar el largo medio de una cola sino también otros largos, que pueden ocurrir en ciertos ciclos. Se llamará largo crítico a aquel largo de cola que sólo se excederá en una proporción muy baja de los ciclos. Como una primera aproximación puede tomarse el largo crítico N_c como

$$N_c = 2 N' \quad (462.4)$$

donde

N_c = largo crítico de la cola

N' = largo del final de la cola calculado usando la ecuación (462.2)

4.6.3. Demoras a peatones

Las fórmulas anteriores pueden adaptarse para calcular demoras a peatones suponiendo que éstos tienen flujos de saturación muy altos.

La demora media por peatón en segundos es

$$d = r_2 / 2c \quad (463.1)$$

r = rojo efectivo para el peatón (seg).

c = duración del ciclo (seg)



4.6.4. Detenciones

La proporción de vehículos de un movimiento que debe detenerse al menos una vez viene dada por

$$h_i = 0.9 \left(\frac{1 - u_i}{1 - \gamma_i} \right) \quad (464.1)$$

donde

h_i = proporción de vehículos que se detienen

u_i = (v_i/C) razón de verde efectivo

γ_i = razón de flujo para el movimiento (q_i/s_i)

El factor 0.9 corrige para tomar en cuenta aquellos vehículos que sólo sufren una detención parcial.

Si un ciclo no se encuentra saturado, y no han quedado vehículos en la cola de un ciclo anterior cada vehículo se detendrá a lo más una vez. En ese caso h_i en la fórmula (464.1) referente también el número (promedio) de detenciones por vehículo. Este manual propone estimar el número de detenciones por vehículo directamente de:

$$h'_i = \left(\frac{1 - u_i}{1 - \gamma_i} \right) \quad (464.2)$$

es decir, se ha reemplazado el coeficiente 0.9 por 1.0

El número total de detenciones de un movimiento viene dado por

$$H_i = q_i h'_i \quad (464.3)$$

donde

q_i = es el volumen del movimiento en vehículos por unidad de tiempo

H_i = es el número de detenciones por unidad de tiempo para el movimiento i

4.6.5. Indicadores secundarios

Indicadores secundarios como emisión de contaminantes o consumo de combustibles, pueden estimarse utilizando relaciones del tipo:

$$P = f_1 T + f_2 D_s + f_3 H \quad (465.1)$$

donde

P = indicador de interés, por ejemplo (litros combustible/hora)

T = Movimiento total calculado como distancia a recorrer (km) multiplicado por flujos en veh./h.

D_s = Demora total en detención (veh-h/h)

H = número total de detenciones completas

f_1, f_2, f_3 = factores que relacionan el indicador E con el movimiento total, las demoras y paradas.

Estos parámetros no han sido calibrados aún para las condiciones chilenas.

Es posible simplificar la fórmula anterior si se supone que el movimiento total T no varía con los tiempos de diseño de un semáforo.

En ese caso lo que interesa es el peso relativo que debe darse a las detenciones con respecto a las demoras. En general el consumo de combustible y la emisión de contaminantes depende más del número de detenciones que de las demoras. La molestia de los conductores parece estar más relacionada con la demora que con las detenciones.

Una medida sencilla que toma en cuenta estos dos efectos está dada por

$$P = D + K H \quad (465.2)$$

donde

P = eficiencia del diseño del semáforo (veh-h/h)
 D = demora total (veh-h/h) calculada como la suma de las demoras a cada movimiento mediante ecuación (461.2).

H = número total de detenciones por hora calculada como la suma de los totales de cada movimiento usando ecuación (464.3)

K = importancia relativa de las detenciones con respecto a las demoras (generalmente entre 10 y 60, para más detalle ver la sección siguiente).

4.7. DETERMINACION DE LA DURACION DE LAS INDICACIONES

El diseño de una intersección controlada por semáforos requiere seleccionar los siguientes parámetros críticos de control: duración del ciclo, tiempos de verde (y entreverdes) y retrasos para sistemas coordinados.

La forma tradicional de calcular éstos es buscar valores para las variables de control que minimizan las demoras totales. La introducción de un indicador compuesto P en la sección anterior, permite diseñar semáforos que minimicen (aproximadamente) ese indicador.

En el cálculo de los tiempos de un semáforo es necesario identificar los movimientos críticos de la intersección. Los parámetros que interesan de estos movimientos o corrientes críticas son el tiempo desaprovechado (o perdido), la razón de tiempos verdes u , y la razón de flujos Y . La suma de cada uno de estos parámetros para todos los movimientos críticos de la intersección constituyen el tiempo desaprovechado total L , razón de verde U y la razón de flujo Y .

4.7.1. Ciclo óptimo

Es posible calcular el ciclo que aproximadamente minimiza un indicador del comportamiento de una intersección calculado como la suma de los indicadores correspondientes a cada movimiento crítico.

Por ejemplo, se requiere calcular la duración del ciclo que minimiza las demoras a los vehículos que usan los movimientos críticos de una intersección. Si el ciclo es muy largo ciertas colas crecerán demasiado y los vehículos sufrirán una demora excesiva. Si el ciclo es demasiado corto, debido a las variaciones de los flujos en el tiempo, varios vehículos no podrán despejar la intersección durante el primer ciclo y también incurrirán en demoras demasiado largas. El ciclo óptimo (con respecto a demoras en los movimientos críticos) tendrá una duración intermedia entre el ciclo máximo (generalmente 120 segundos) y el ciclo mínimo que permite satisfacer la demanda existente.

En cada cambio de fase hay un tiempo perdido l , y por lo tanto hay un tiempo total desaprovechado

L en cada ciclo completo, cualquiera sea su longitud. Este tiempo desaprovechado corresponde a una pérdida de la capacidad última de la intersección. Esta pérdida de capacidad se minimiza si se reduce el número de ciclos por hora. Por ello, el ciclo máximo (120 segundos) también maximiza la capacidad de la intersección (aunque puede producir demoras excesivas).

La duración del ciclo que aproximadamente minimiza las demoras de los movimientos críticos está dado por

$$C_o = \frac{1.5L + 5}{1 - Y} \quad (471.1)$$

En vez de minimizar demoras se puede querer minimizar un indicador compuesto $P_c = D_c + K H_c$ donde D_c es la demora total para las corrientes críticas, H_c el número total de detenciones para las mismas y K es la importancia relativa de las detenciones. Se sugiere utilizar la siguiente fórmula para calcular el ciclo que

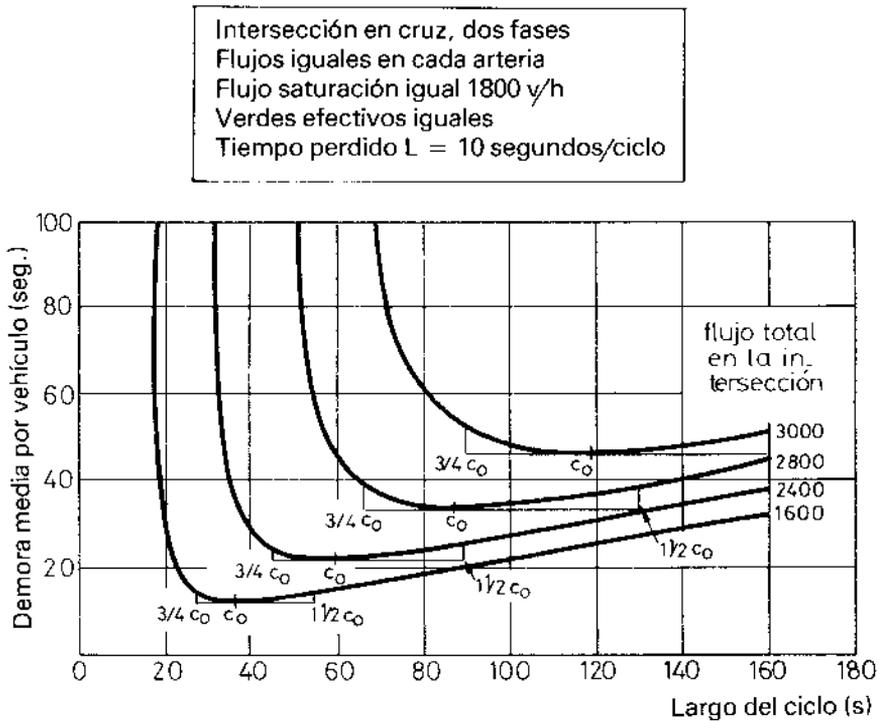


Fig. 4.24. EFECTO DE VARIACIONES DE LA DURACION DEL CICLO.

minimiza este indicador.

$$C'_o = \frac{(1.4 + 0.01k) L + 6}{1 - Y} \quad (471.2)$$

donde

C'_o = el ciclo óptimo (segundos)

L = tiempo desaprovechado total

Y = razón de flujo total

K = ponderación de detenciones

Se sugiere que los siguientes valores para K

Objetivo	Valor: K
Minimizar consumo de combustibles	40
Minimizar costos (incluyendo demoras)	20
Minimizar la suma de las colas para los movimientos críticos	-30

Como la ecuación (471.2) es mayor que la ecuación (471.1) éstas no son estrictamente equivalentes para $K = 0$ (Minimizar demoras). Sin embargo, ambas fórmulas producen prácticamente los mismos ciclos óptimos para los valores normales del resto de los parámetros.

Aún más, las curvas que muestran la demora total contra duración del ciclo son bastante planas cerca del óptimo como se puede ver en la Fig.4.24. Esto significa que pueden adoptarse ciclos en el rango $0.75 C'_o$ a $1.50 C'_o$ sin afectar demasiado las demoras totales.

4.7.2. Ciclo práctico

Hay a menudo algunas ventajas adicionales, en adoptar un ciclo ligeramente menor al óptimo. Estas son:

- i) El ciclo C'_o es sólo óptimo para los movimientos críticos. Presumiblemente los otros movimientos requerirían ciclos más cortos y por lo tanto sufren demoras mayores de lo estrictamente necesario. La adopción de un ciclo más corto reduciría este problema.
- ii) Si el flujo de saturación decrece durante una fase se obtiene un comportamiento mejor con un ciclo más corto.
- iii) En sistemas coordinados se usa generalmente un ciclo común para todas las intersecciones. El adoptar un ciclo largo perjudica el rendimiento de intersecciones con flujos inferiores.

Para ello es conveniente tener otras técnicas complementarias que permiten calcular, por ejemplo, ciclos menores que tengan características conocidas.

Uno de estos ciclos es el ciclo mínimo, calculado como

$$C_m = \frac{L}{1 - Y} \quad (472.1)$$

Este ciclo es el más corto que permite satisfacer la demanda.

Otro ciclo de interés es aquel que asegura que el grado de saturación de cada movimiento es inferior a un máximo grado de saturación aceptable x_p . Este ciclo se llama a veces **ciclo práctico** y se calcula como

$$C_p = \frac{L}{(1 - U)} \quad (472.2)$$

C_p = ciclo práctico

L = tiempo desaprovechado total

U = razón de verde para la intersección

$$U = \sum u_i$$

Debe recordarse que el grado de saturación de un movimiento viene dado por

$$x_i = q_i / s_i v_i = y_i / u_i \quad (472.3)$$

por lo tanto

$$u_i = y_i / x_i = q_i / s_i x_i \quad (472.4)$$

donde

q_i = volumen del movimiento (veh/h)

s_i = flujo saturación del movimiento (veh/h)

x_i = grado de saturación (máximo)

En general se recomienda adoptar valores de $x_p = 0.9$, a menos que se sepa que los flujos crecerán rápidamente antes que pueda modificarse el diseño.

4.7.3. Tiempos de verde

i) General

Para una duración de ciclo dado C , el tiempo de verde total disponible es $(C - L)$, donde L es la suma de los tiempos desaprovechados para los movimientos críticos. Este tiempo de verde total puede distribuirse a cada movimiento crítico como sigue:

$$v_i = \left(\frac{C - L}{U} \right) u_i \quad (473.1)$$

donde

u_i = razón de verde para el movimiento i

U = razón de verde para la intersección

v_i = tiempo efectivo de verde (seg)

Esta fórmula puede emplearse para cualquier caso, exceptuando:

- movimientos no-críticos cuando hay traslapos.
- cuando v_i es menor que el verde mínimo aceptable (por ejemplo 10 segundos)

Si se trata de un caso en que todos los movimientos críticos tienen igual grado de saturación, entonces se pueden usar las razones de flujo y_i y Y en vez de u_i y U . Ambas fórmulas son más exactas que la relación aproximada sugerida en la sección 4.2.5. Se considera también las necesidades del peatón, sección 4.8.4.

ii) Movimientos no-críticos

Si el movimiento crítico no era de traslapo el verde de los movimientos no-críticos será el mismo estimado en 473.1 a menos que ese movimiento no-crítico tenga un tiempo desaprovechado l_i distinto. En este último caso.

$$v_i = (v_c + l_c) \cdot l_i \quad (473.2)$$

v_i = verde para movimiento no crítico (seg)
 v_c = verde para movimiento crítico (seg)
 l_c y l_i = tiempos desaprovechados para movimiento crítico y no-crítico.

Si el movimiento crítico es de traslapo entonces la repartición del verde entre los movimientos no-críticos correspondientes puede hacerse utilizando un pseudo sub-ciclo C^* definido como:

$$C^* = \sum_c v_c + \sum_c l_c \quad (473.3)$$

donde $\sum_c v_c$ es la suma de los verdes para movimientos críticos traslapados.

$\sum_c l_c$ es la suma de los tiempos desaprovechados correspondientes

Habrà también en este caso un pseudo tiempo total desaprovechado $L^* = \sum_c l_c$

La repartición del verde se hará entonces como:

$$v_i = \left(\frac{C^* - L^*}{U^*} \right) u_i \quad (473.4)$$

donde

$$U^* = \sum_c u_c$$

suma de razones de verde para movimientos no traslapados.

Es poco probable que se den estas condiciones en una intersección a menos que ésta sea muy compleja.

iii) Tiempos de verde presentado (real)

Las fórmulas anteriores permiten calcular los verdes efectivos. Sin embargo, el diseñador de un semáforo debe especificar la duración de la fase que mostrará verde en términos reales. Para obtener estos tiempos es necesario corregir los tiempos efectivos como sigue:

$$V_a = (v_i + l_i) - E_a \quad (473.5)$$

donde:

v_i = verde efectivo para el movimiento que recibe verde en esa fase solamente.

l_i = tiempo desaprovechado correspondiente.

E_a = entreverde correspondiente a la fase a

V_a = verde presentado fase a

4.8. CONSIDERACIONES ESPECIALES

4.8.1. Análisis Simplificado

Las fórmulas indicadas en la sección 4.2. pueden usarse como primera aproximación y en aquellos casos que no presentan dificultades; a saber:

- bajos flujos peatonales
- pocos virajes a la izquierda
- dos fases
- intersecciones sencillas (en T o cruz)

Con el objeto de realizar cálculos aproximados a las siguientes simplificaciones pueden adoptarse en esos casos:

- suponer que todos los tiempos desaprovechados son iguales al entreverde.
- no considerar la diferencia entre verde presentado y verde efectivo.
- usar el valor promedio para equivalencias de vehículos que viran (obstaculizados o no). no considerar movimientos no críticos. suponer que el grado de saturación es igual para los movimientos críticos.
- utilizar sólo el ciclo que minimiza las demoras.

Si bien estas simplificaciones pueden producir cálculos más rápidos y existirán muchos casos en que no serán suficientes. Situaciones de alta congestión, con muchos virajes y/o peatones, o que usan más de dos fases, requieren el análisis más detallado presentado en este Manual.

Aún más, en la actualidad los fabricantes de equipos para semáforos están desarrollando nuevos sistemas más sofisticados que mejorarán

la eficiencia de este tipo de control. Estos avances no se encuentran todavía totalmente probados. Sin embargo, los conceptos desarrollados en este Manual han sido seleccionados de manera que sean compatibles con la nueva tecnología cuando ésta sea lo suficientemente confiable. En particular, el concepto de movimiento crítico y la metodología asociada a su identificación y empleo en el diseño del semáforo, se han destacado como indispensables en el diseño de semáforos avanzados.

4.8.2. Análisis Avanzados

Algunos de los programas computacionales más importantes para el diseño de semáforos se describen brevemente a continuación:

- i) SIGCAP un programa que usa programación lineal para diseñar un semáforo maximizando su capacidad práctica y sugiriendo cómo puede mejorarse ésta mediante alteraciones menores.
- SIGSET un programa que usa programación matemática no lineal para diseñar los tiempos de un semáforo que minimicen las demoras, un programa para analizar diferentes secuencias de fases en intersecciones complicadas.
- SQGN un programa para calcular fases y ciclos en intersecciones temporales saturadas.
- SIGGAT un programa para calcular fases y ciclos en intersecciones temporales saturadas.

Estos programas requieren sólo la información que se usa normalmente en métodos manuales, pero toman en cuenta todos los movimientos y no sólo los críticos o representativos.

Actualmente se está trabajando en la implementación de estos programas en microcomputadores de escritorio y en integrar todos los programas a un paquete común.

- ii) El programa TRANSYT se utiliza para el diseño de sistemas de semáforos coordinados centralmente por un computador. Como una opción de la versión 8 de TRANSYT es posible calcular detalladamente los semáforos de cada intersección.

4.8.3. Semáforos activados por el tránsito

La característica principal de los semáforos activados por el tránsito es que la duración de los períodos verdes, y por ende la duración del ciclo, responden en general a las variaciones de la demanda del tránsito vehicular. Esta demanda se registra mediante detectores de tránsito, generalmente del tipo "lazo de inducción".

La adaptación de las fases y ciclos al tránsito se

hace más ventajosa para niveles bajos y medios de volumen vehicular. Por otra parte, un semáforo que puede responder a la demanda vehicular tiene normalmente un costo de inversión más alto. Además, tienen más posibilidades de falla (en particular de los detectores) y un mayor costo de mantención. Es posible que un semáforo activado por el tránsito que funciona defectuosamente genere más demoras que uno de tiempos fijos. Por ello la adecuada detección de fallas y su pronta rectificación son aún más importantes en este tipo de semáforos.

— Criterios para su instalación

Desde el punto de vista de las demoras sería posible justificar la instalación de un semáforo activado por el tránsito, para volúmenes vehiculares menores que los establecidos en la sección 4.1.4.2.

Sin embargo, es necesario considerar el costo adicional (de inversión, mantención y riesgo de falla) que esto implica.

Por ello, se aceptará la instalación de este tipo de semáforos si alguno de los tres primeros criterios de la sección se cumplen en al menos un 75%. Es decir, los volúmenes vehiculares y/o peatonales deberán ser al menos un 75% de los valores presentados en esos cuadros para el criterio seleccionado.

4.8.3.1. Semáforos semi-activados por el tránsito

Se llama semáforos semi-activados por el tránsito a aquellos en los cuales sólo se detectan los vehículos en una de las calles de la intersección, normalmente la calle secundaria. En este caso el derecho de paso (verde) permanece en la arteria principal y sólo se transfiere a la calle secundaria si se ha registrado una demanda para ello (1 vehículo ha sido detectado).

Este sistema tiene la ventaja de que sólo se requieren detectores en la calle secundaria. Sin embargo, los semáforos semi-activados presentan algunos problemas que no los hacen recomendables para Chile:

- los semáforos semi-activados presentan una tasa mayor de accidentes que aquellos que son totalmente activados por el tránsito.
- La llegada de un vehículo a la calle lateral interrumpe el flujo en la arteria principal en forma arbitraria (a menos que su verde mínimo no se haya cumplido todavía) aun cuando este flujo sea alto en ese momento.

4.8.3.2. Semáforos (totalmente) activados por el tránsito

Los controladores de estos semáforos utilizan detectores en todas las arterias que llegan a la intersección, y de esta manera pueden asignar en forma más equilibrada las fases correspondientes.

Se describirán aquí solamente los más sencillos y que constituyen la recomendación del presente Manual.

Las lentes para peatones tendrán la forma circular de diámetro 0,30 m. Los cabezales estarán ubicados a una altura sobre la acera de entre 2,30 y 3,00 m.

4.8.4.2. Tiempo de cruce de peatones

En general los tiempos de cruce de peatones pueden estimarse siguiendo las siguientes velocidades medias:

Niños de 6 a 10 años	1.1 m/seg.
Adolescentes	1.8 m/seg.
Adultos: hombres	1.6 m./seg
mujeres	1.4 m/seg
Mayores de 55 años: 10% menos	

Como promedio general puede adoptarse 1.4 m/seg.

En cada diseño de tiempos verdes vehiculares de un semáforo deberá verificarse si éstos permiten el cruce seguro de peatones entre las calzadas correspondientes. Para ello deberá calcularse el tiempo de cruce de un peatón medio y agregar al menos 5 segundos extra de seguridad. Estos tiempos de cruce constituirán un mínimo para la duración de los tiempos verdes vehiculares correspondientes. El diseño del semáforo deberá modificarse de acuerdo con estas recomendaciones.

Si los peatones que cruzan en un semáforo tienen una estructura de edad peculiar, debe adoptarse la velocidad de cruce más adecuada.

4.8.4.3. Duración períodos peatonales

Se considera necesario introducir luces peatonales. Es necesario calcular la duración de las 3 indicaciones:

- rojo
- verde continuo
- verde centellante o discontinuo

La duración de los dos períodos verdes (verde + verde centellante) debe calcularse de modo que un peatón medio pueda cruzar con seguridad (tiempo de cruce más 5 segundos). Esta duración debe alargarse si hay un alto flujo peatonal o si la duración del fijo a movimientos vehiculares problemáticos así lo permite.

La duración del verde centellante será igual al 90% del tiempo de cruce de un peatón medio (redondeado al segundo más cercano).

La duración del verde continuo tendrá un mínimo de 5 segundos. El verde continuo comenzará 1 segundo después del fin del período amarillo para los flujos vehiculares problemáticos.

El verde centellante terminará (cambiará a rojo) al menos 3 segundos antes del comienzo del verde que da derecho de paso a movimientos vehiculares problemáticos.

Si la duración del rojo a los movimientos vehiculares problemáticos lo permite, se prolongará el verde peatonal continuado más allá del mínimo necesario.

Estos criterios deberán usarse también en el diseño de fases peatonales exclusivas.

4.9. COORDINACION DE SEMAFOROS

La coordinación de semáforos es una de las formas más eficientes de reducir demoras, consumo de combustibles, contaminación y accidentes. Los parámetros más importantes que controlan un sistema coordinado son:

- Duración del Ciclo (40-120 segs.). Generalmente todos los semáforos coordinados funcionan con un ciclo común.
- Repartición o Asignación de Verde. La proporción del ciclo (común) que ofrece un período verde a cada corriente de tránsito.
- Desfase. El período que transcurre entre el comienzo de una fase verde específica, en el comienzo de una fase verde específica, en un semáforo en particular.
- Controlador maestro. Un semáforo tomado como referencia. En sistemas pequeños el equipo central de control puede estar en sus cercanías.
- Plan o programa. Instrucciones que definen la forma en que cada semáforo operará en el tiempo (reparto de verde, desfase, ciclo). Estas instrucciones se pueden transmitir como una serie de señales eléctricas o por radio a cada semáforo/controlador local.

Originalmente se coordinan semáforos a lo largo de un corredor. Esquemas sencillos como ese pueden a veces diseñarse mediante técnicas gráficas (Banda verde). Si el corredor tiene tránsito en dos sentidos y semáforos irregularmente espaciados, puede ser difícil, o incluso imposible ofrecer una "banda verde" sin interrupciones y que satisfaga la demanda.

Estos planes son generalmente fijos y calculados sobre la base de datos históricos sobre flujos y velocidades. Progresos en el diseño y manufactura de computadores han permitido su uso en la operación de sistemas coordinados. Cuando se usa un computador no sólo se puede cubrir un área geográfica más grande, sino que también el control puede hacerse más sofisticado y pueden agregarse otros tipos de servicios complementarios, como por ejemplo la detección de fallas.

4.9.1. Sistemas sin computador

- i) Sistemas con planes fijos
Es aquí donde nace el concepto de controlador maestro. Los planes se calculan externamente y se implementan en cada controlador local. Estos sistemas requieren señales para indicar los cambios de fase. Pueden basarse en relojes que funcionan con la frecuencia del servicio eléctrico (subestación común), o relojes de cuarzo de gran precisión. En este caso no se requieren cables, pero la coordinación se comenzará a perder, requiriendo mantención y re-coordinación.

Si se pueden tender o utilizar cables, las señales para el cambio de fase pueden venir del controlador maestro. Se pueden implementar planes para distintas horas del día respondiendo así a la demanda.

También emplean sistemas coordinados que utilizan señales de radio para transmitir las instrucciones de control.

ii) **Sistemas semi-flexibles**

En este caso, las intersecciones funcionan en un ciclo común el cual se divide en una parte fija y una no-controlada. La parte fija es la que se encarga de mantener la progresión o coordinación en la arteria principal.

Si hay demanda en alguna de las calles secundarias, ésta se satisface durante la parte no-controlada del ciclo. Esta parte no-controlada funciona entonces como una intersección activada por el tránsito.

4.9.2. Sistemas controlados por un computador

En general, en los sistemas controlados por computador éste no sólo se encarga de enviar señales o instrucciones de cambio de fase a los controladores locales, sino que provee otras funciones:

- planes para vehículos de emergencia (ambulancias, bomberos, policía) de manera que éstos cuenten con una banda verde especial.
- letreros variables, que indiquen por ejemplo el cambio de sentido de una arteria.
- información sobre la disponibilidad de estacionamiento.
- conteo automático de tránsito.
- comprobación del buen funcionamiento de los controladores locales incluso hasta el nivel de funcionamiento de las ampolletas si es necesario.

Generalmente estos sistemas se complementan con el uso de televisión de circuito cerrado para ayudar a la detección y resolución de problemas locales.

La mayor parte de estos sistemas deben operar con dos computadores acoplados, uno manteniendo el control y el otro de respaldo en caso de que el primero sufra una falla.

Una de las ventajas de la operación dual es que el segundo computador puede emplearse para otros trabajos de ingeniería de tránsito, por ejemplo la puesta al día de planes fijos y la mantención de una base de datos actualizada.

Gracias al desarrollo de los microprocesadores es posible adquirir sistemas compactos que ofrecen todos los servicios mencionados en el párrafo anterior, a bajo costo para operar alrededor de 120 intersecciones.

4.9.3. Planes fijos y planes dinámicos

Desde que se introdujo el uso de computadores en la coordinación de semáforos se ha sugerido que en lugar de emplear planes fijos calculados con datos históricos, se debería prescindir de planes y responder a la demanda local en forma inmediata pero sin perder la coordinación. Se habla así de sistemas fijos y sistemas dinámicos o adaptivos.

Es necesario señalar que para que un sistema dinámico funcione bien se requiere:

- un gran número de detectores de tránsito.
- un buen modelo de comportamiento de los grupos de vehículos.
- capacidad y velocidad del computador, para analizar datos y elegir el mejor plan para cada intersección aislada **sino** para el conjunto.
- líneas de comunicación de capacidad suficiente y que no sean muy sensitivas a interferencias externas.
- mecanismos para cumplir fallas en el equipo, particularmente detectores.

4.9.4. Cálculo de planes

4.9.4.1. Sistemas sencillos (arteriales)

i) **Sistema simultáneo**

Este es uno de los primeros sistemas empleados, probablemente el origen del término "sincronización de semáforos". Bajo este sistema todos los semáforos de una arteria muestran el mismo color al mismo tiempo. Este sistema utiliza un solo controlador maestro y el desfase entre semáforos es cero.

Por supuesto este sistema es muy difícil de aplicar eficientemente a menos que existan distanciamientos muy largos entre intersecciones.

La relación que debe cumplirse entre velocidad media, duración de ciclo y espaciamiento entre semáforos es:

$$D = 0.28 VC \quad (494.1)$$

en que

D = espaciamiento (en metros)

V = velocidad de circulación (en Km/Hr)

C = duración del ciclo (en segundos)

Por ejemplo, si la velocidad es de 30 Km/hr. y la distancia de 200 metros, el ciclo debe ser de 24 segundos lo que es demasiado corto.

Este sistema tiene numerosas desventajas:

- normalmente resulta en velocidades altas y detenciones en vez de alguna progresión.
- el sistema si opera es sólo eficiente para las intersecciones importantes.
- requiere separación uniforme de semáforos.

Sin embargo, a veces puede usarse para dos o tres intersecciones muy cercanas que son parte de un sistema mayor.

Si el sistema es doble la relación es:

$$D = 0.07 CV \quad (494.3)$$

ii) Sistema alternado

En este caso los semáforos de intersecciones contiguas presentan colores alternados.

En el sistema sencillo se presentan indicaciones contrarias. En sistemas alternados dobles y triples dos o tres semáforos operan simultáneamente y muestran colores alternados con el grupo adyacente. En el caso del sistema alternado simple el desfase es exactamente medio ciclo. Para el caso de los sistemas múltiples el desfase es cero para los semáforos simultáneos, y medio ciclo para los demás.

En general este sistema es superior al anterior, pero aún no aporta la flexibilidad que se requiere en la mayoría de los casos.

La relación entre espaciamento, velocidad y longitud del ciclo es ahora:

$$D = 0.14 CV \quad (494.2)$$

Por ejemplo, para el caso anterior se utiliza un sistema alternado simple. El ciclo puede ser de 48 segundos, lo que es más razonable.

Las mayores limitaciones de este sistema son:

- requiere reparticiones de verde básicamente semejantes para la arteria principal y secundaria.
- no se adapta bien a arterias que tengan semáforos espaciados en forma irregular.
- es difícil de ajustar a las condiciones de tránsito ya que esencialmente la longitud del ciclo debe permanecer constante.

Sin embargo, este sistema puede aplicarse en redes cuadriculadas regulares, como las que existen en el centro de varias ciudades de nuestro país.

iii) El diagrama espacio-tiempo

El diseño de progresiones más flexible en arterias principales requiere el uso del llamado diagrama espacio-tiempo. Este diagrama permite calcular "por tanteo" los desfases que mantienen (si es posible) a todos los vehículos en movimiento y hacen un uso efectivo de los períodos de verde.

En un diagrama espacio-tiempo se ubica generalmente el espacio en el eje vertical y el tiempo en el horizontal como muestra la Fig. 4.25.

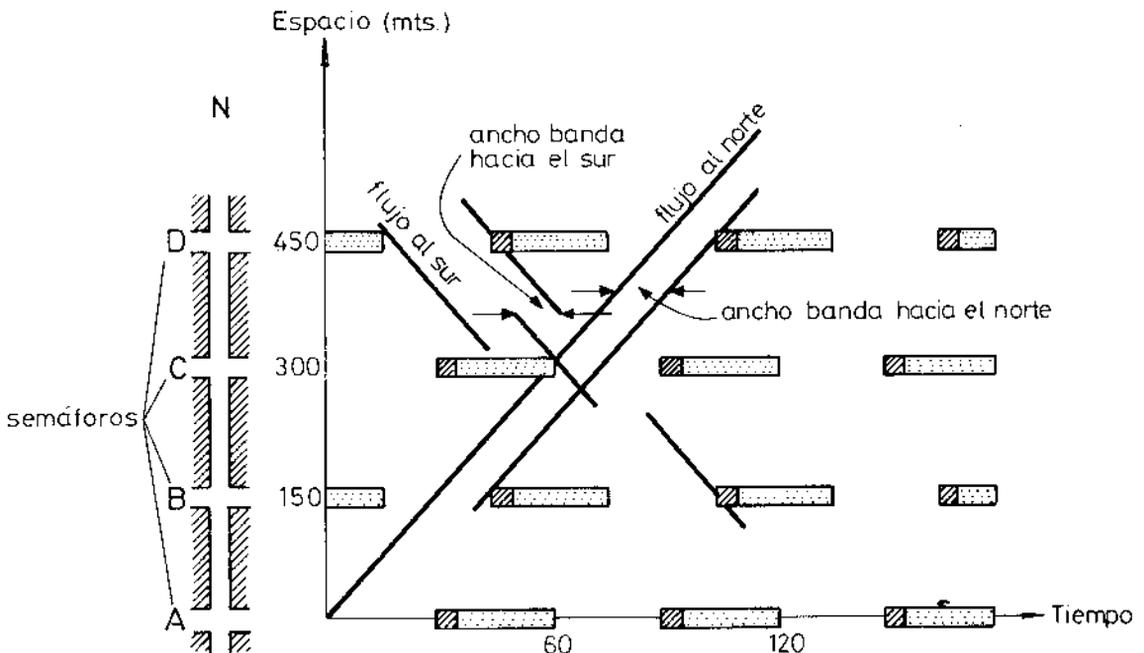


FIG. 4.25. DIAGRAMA ESPACIO - TIEMPO

Los periodos de verde y rojo efectivo (no requiere señalar amarillo) se indican en la parte del diagrama que corresponde a la ubicación de cada intersección. El color mostrado es el que enfrenta el tránsito en la arteria principal. El rojo se puede representar por un área achurada // // // // o simplemente una línea gruesa sólida. El color verde se representa por la ausencia de indicación alguna, es decir el espacio entre rojos. La trayectoria de un vehículo se presenta como una línea, cuya pendiente representa la velocidad del vehículo (en una escala apropiada a las escalas de los ejes vertical y horizontal).

El desfase entre una intersección base (generalmente la inferior. A en la Fig. 4.25.) y cualquier otra intersección está dado por la separación horizontal del comienzo del periodo verde. Generalmente el periodo verde comienza en $t = 0$ para la intersección base.

El problema consiste, entonces, en manipular el desfase las intersecciones (excepto la base) de modo de permitir el paso máximo de vehiculos sin detenerse y a una velocidad promedio razonable. Esto se hace generalmente por tanteo.

iv) **Sistemas progresivos**

En este caso el desfase entre semáforos puede tener cualquier valor y no necesariamente una función fija del ciclo común. En sistemas más avanzados el desfase puede ser diferente en distintos periodos del día (de demanda máxima fuera de él), así como puede variar la repartición del verde.

La supervisión de los controles individuales de cada intersección se logra mediante un controlador maestro. También es posible mantener la coordinación mediante relojes digitales en cada controlador local, los que se usan para iniciar los cambios de fase y de plan.

Para obtener una máxima flexibilidad del sistema los conteos de tránsito deben efectuarse frecuentemente. Generalmente se emplean tres planes, máxima demanda de la mañana, fuera de dicho periodo y máxima demanda de la tarde.

Es posible usar otros programas computacionales para diseñar sistemas progresivos, por ejemplo TRANSYT.

4.9.4.2. **Sistemas de redes**

No siempre se trata de coordinar semáforos a lo largo de una arteria. La coordinación de intersecciones controladas por semáforos en una red reviste complicaciones adicionales. En general no es posible producir "bandas verdes" por las cuales los vehículos circulen sin detenerse.

La coordinación de semáforos en una red tampoco puede estudiarse simplemente usando métodos gráficos. Los programas de computación juegan aquí un papel muy importante. Se han de-

sarrollado varios programas para el cálculo de planes, los más conocidos son:

- SIGOP
- COMBINATION METHOD
- TRANSYT

Los tres programas producen siempre mejores resultados que coordinaciones realizadas en forma manual:

- EL COMBINATION METHOD es el programa más rápido de ejecutar.
- SIGOP y TRANSYT producen los mejores resultados.
- TRANSYT es marginalmente superior a SIGOP, en gran parte debido a su flexibilidad.

Se recomienda el programa TRANSYT en la preparación de planes fijos de coordinación de semáforos.

4.9.5. **Requisitos para la instalación de sistemas coordinados**

4.9.5.1. **Requisitos Generales**

Al igual que existen requisitos para la instalación de semáforos también es necesario adoptarlos para la instalación de sistemas coordinados. La adopción de un sistema coordinado implica varios costos en términos de:

- Nuevo equipo de control central
- Modificación de intersecciones
- Equipo de comunicaciones
- Estudios (conteos, preparación de planes, etc.)
- Entrenamiento de personal
- Mantenimiento del equipo
- Puesta al día de planes.

Si se instala un sistema coordinado donde los beneficios no logran superar los costos mencionados se estará haciendo una mala inversión.

Es posible utilizar un programa de computación como TRANSYT para estimar los beneficios que producirían con la instalación de un sistema coordinado. Sin embargo, éstos son sólo una estimación y a menudo, al menos parte de estos beneficios, podrían obtenerse con sólo poner al día los diseños de los semáforos existentes.

Por ello, algunos países han adoptado requisitos básicos para la instalación de estos sistemas.

4.9.5.2. **Requisitos básicos**

i) **Sistemas que utilizan computador central**

Estos pueden adoptarse en áreas en las que hay por lo menos 4 intersecciones controladas por semáforo por kilómetro cuadrado o alternativamente al menos 4 semáforos por kilómetro de arteria.

Se requiere además que el sistema total tenga al menos 50 intersecciones contro-

ladas por semáforo. No hay límite superior.

Cada uno de los semáforos mencionados aquí debe encontrarse plenamente justificado por al menos uno de los criterios mencionados en la sección 4.1.2, excepto el criterio de mantenimiento de una progresión adecuada.

En otras palabras, no basta con demostrar que el número o densidad de intersecciones controladas por semáforos es suficiente. Es necesario demostrar también que todos los semáforos mencionados se justifican por otro requisito.

ii) **Sistemas más sencillos (sin computador, sin cables)**

En el caso de una arteria con flujo homogéneo y con poca o nula interferencia de calles laterales, se requiere que existan por lo menos 5 intersecciones controladas por semáforos separadas cada una por no más de 1.000 metros.

En el caso de calles normales se requiere el mismo criterio pero la separación máxima se reduce a 250 metros, debido a que los volúmenes de las calles laterales introducen perturbaciones en la progresión.

Cada uno de estos semáforos debe estar justificado independientemente de acuerdo con los criterios mencionados en el punto anterior.

4.9.6. Consideraciones prácticas

4.9.6.1. Costo

El tamaño físico y costo de los computadores ha bajado mucho. El costo por intersección, sin embargo, es raro que baje de US\$ 16.000, incluyendo equipo de transmisión de datos, obras civiles y modificaciones.

Sin embargo, los beneficios de estos sistemas (si se encuentran justificados por los requisitos anteriores) son sustanciales y en general se estima que se recuperan los costos de instalación dentro del primer año de operaciones (En términos de tiempo ahorrado).

Cabe señalar que los beneficios dependen del cálculo de planes adecuados y de la calidad de los datos suministrados. Esto requiere un esfuerzo permanente de recolección de datos y puesta al día de planes. Los errores son más graves en un sistema centralizado que en uno independiente.

Generalmente al instalar un sistema coordinado se aprovecha para reemplazar equipo anticuado y en algunos casos mejorar la geometría de algunas intersecciones. Los costos en Ingeniería Civil para corregir ésto más el tendido de cables puede ser considerable.

En algunos casos es posible arrendar líneas telefónicas para conectar controladores locales con el control central. Si bien esto reduce costos de inversión puede resultar en altos costos de operación. La conexión por radio tiene atractivos pero también limitaciones.

4.9.6.2. Equipos de detección de tránsito

Es un sistema coordinado y controlado por computador, es muy útil contar con información inmediata de los flujos de tránsito en las arterias principales. Esto es válido aun cuando sólo se adopten planes fijos y no dinámicos.

La forma más práctica de obtener esto es mediante detectores de lazo.

Los detectores de lazo son razonablemente confiables siempre que se los mantenga adecuadamente. De acuerdo con la configuración usada estos detectores pueden entregar información sobre flujos (clasificados o no), velocidades, densidades de tránsito y largo de colas.

Se han desarrollado otros tipos de detectores, fundamentalmente del tipo ultrasonido, de radar o de tubos neumáticos. Por el momento todos estos presentan problemas ya sea de mantenimiento, alineación o de señales falsas.

4.9.6.3. Estándares

Es importante tener en cuenta que es muy probable que cualquier sistema de coordinación que se instale deberá ser ampliado en el futuro. Es probable que, si se trata de un sistema arterial, el que éste llegue a formar parte de una red mayor en el futuro.

Por ello, es necesario adoptar de antemano estándares para las convenciones de comunicación y control. De este modo podrán instalarse equipos de diferentes fabricantes (que satisfagan ese estándar) interconectados en un mismo sistema. Esto es de gran importancia para asegurar que una ciudad no queda atada a un fabricante único.

4.9.6.4. Sistemas sin cable

Los sistemas sin cable más frecuentes utilizar la frecuencia de la red de energía eléctrica para mantener la sincronización de relojes en cada controlador local. Esto requiere que toda el área esté conectada a la misma subestación alimentadora. Se requiere además de contar con un reloj (normalmente de cuarzo) de respaldo para el caso de falla en el suministro de la energía eléctrica.

La precisión requerida es del orden de por lo menos 2 segundos al año. Una mantención periódica 1 vez al año debe encargarse de actualizar planes y tiempos.

El desarrollo de microprocesadores electrónicos de bajo costo permite el uso de varios planes para distintos días y horas. Existe la posibilidad de reforzar el sincronismo de los relojes mediante señales de radio, pero todavía esto no está bien desarrollado.

4.10. LISTA DE VERIFICACION PARA LA SEMAFORIZACION

La metodología propuesta en el presente manual para la semaforización permite una solución eficiente del problema en que cada condición, re-

quisito, factor, etc., ha sido tratado sistemáticamente.

Como un esquema final, a continuación se da una lista de verificación con la cual, y de seguirse sus pasos, se puede enfrentar y solucionar el problema de semaforización.

-- Lista de verificación

- i) Determinar si se requiere realmente instalar un semáforo en la intersección. Recolectar la información requerida, principalmente conteos de tránsito, y comparar estos datos con los requisitos básicos para justificar una instalación de un semáforo.
- ii) Escoger uno o más períodos de diseño. Estos pueden ser por ejemplo:
 - hora de demanda máxima de la mañana de un día medio.
 - hora de demanda máxima de la tarde de un día medio.
 - hora de período (s) que no sea (n) de demanda máxima.
 - un período hipotético en el futuro (por ejemplo de 2 años más).
- iii) Confeccionar diseños preliminares del diseño geométrico y distribución de pistas de la intersección.
- iv) Describir las corrientes o movimientos que usarán la intersección.
- v) Medir o estimar los flujos de saturación para cada movimiento y escoger los grados de saturación aceptables para cada movimiento.
- vi) Determinar los movimientos críticos, el

- vii) diagrama de etapas o fases y calcular sus longitudes y la duración óptima del ciclo. Revisar los flujos de saturación y otros detalles de su diseño si existen movimientos obstaculizados sin una fase especial.
- viii) Repetir los cálculos y etapas iv) a vii) para cada uno de los períodos de diseño.
- ix) Calcular índices de eficiencia para cada uno de sus diseños y cada período; en particular demoras.
- x) Repetir los cálculos en etapas iii) a vii) para otros diseños geométricos de la intersección.
- xi) Tomar una decisión sobre el diseño más adecuado y confeccionar planos detallados para la misma.
- xii) Contratar la construcción y montaje del nuevo sistema y vigilar su implementación.
- xiii) Estudiar el comportamiento de la intersección en los días que sigan a su inauguración y comparar los índices de rendimiento observados con los producidos en la etapa de diseño. Corregir y modificar los tiempos del diseño adoptado y/o la geometría de la intersección misma. Esta etapa del diseño, a menudo llamada sintonización fina de la intersección, es fundamental en la obtención de un diseño eficiente.
- xiv) Establecer o integrar la intersección en el programa de mantención regular de semáforos. Revisar cada dos años los flujos y el diseño para decidir si se hace necesario un cambio. Hacer esta revisión más a menudo si existen circunstancias que induzcan a cambios rápidos en las condiciones.