



PPD / IT/NT 03

PROGRAMA MASTER EN INGENIERIA CIVIL  
**UNIVERSIDAD DE PIURA**

**Campus Lima**

## **Diseño de Intersecciones**

---

---

Preparado por el Ing. Civil Jorge A. Timaná Rojas, Master en Ingeniería de Transportes por la University of British Columbia, para el Programa Master de Ingeniería Civil con Mención en Ingeniería Vial de la Universidad de Piura.

Nº de págs. 17

## **TEMA 3: DISEÑO DE INTERSECCIONES**

1. INTRODUCCIÓN
2. SISTEMA DE CONTROL
3. INTERSECCIÓN CON SEMÁFORO
4. SEMÁFOROS DE TIEMPO FIJO
5. REQUISITOS NECESARIOS PARA ESTABLECER LA NECESIDAD DE UN SEMÁFORO
6. TÉRMINOS BÁSICOS
7. ZONAS DE DILEMA
8. LONGITUD DEL CICLO
9. FLUJO DE SATURACIÓN Y TIEMPO PERDIDO

# **Diseño de Intersecciones**

## **1. Introducción**

Una intersección es la interrupción de flujo más común que se puede producir en una vía, la cual presenta las siguientes características:

- Un espacio común es compartido por varias líneas de flujo
- Los conflictos entre las diferentes direcciones de flujo pueden reducirse separándolos en espacio (pasos a desnivel) o en tiempo (sistemas de control)

En este caso, nos interesará profundizar en el tema de Sistemas de control para el análisis de la problemática que se presenta en una intersección.

## **2. Sistema de control**

Un sistema de control es cualquier señal usada para regular, advertir o guiar el tráfico en calles y carreteras, con la finalidad de:

- Reducir la magnitud de puntos potenciales de conflicto
- Facilitar la reducción de demoras
- Tener en cuenta influencia de la velocidad, seguridad, costos de operación y capacidad de la intersección

Debemos tener en cuenta que donde se puede ubicar un sistema de control, la geometría de la vía puede adaptarse, por ejemplo, diseñando y colocando carriles exclusivos

## **3. Intersección con semáforo**

El uso correcto de un semáforo en una intersección aporta diversas ventajas:

- Ordena la circulación y optimiza la capacidad de las calles
- Reduce la frecuencia de ciertos accidentes
- Se pueden sincronizar para mantener circulación continua
- Interrumpe tránsito intenso para dar prioridad y seguridad a peatones

Por el contrario, un sistema deficiente puede presentar diversas desventajas:

- Gastos injustificados
- Demoras injustificadas
- Reacción desfavorable del público usuario
- Incremento de accidentes tipo “alcance” por cambios sorpresivos de color
- Pérdidas de tiempo innecesarias
- Accidentes en zonas rurales sin señales previas


A = Amarillo

V = Verde

Flecha Direccional

COLOR

ROJO

AMARILLO

VERDE



INDICACION

ALTO

TRANSICION

SIGA

Lentes y caras de semáforos

Diferentes arreglos de caras de semáforos

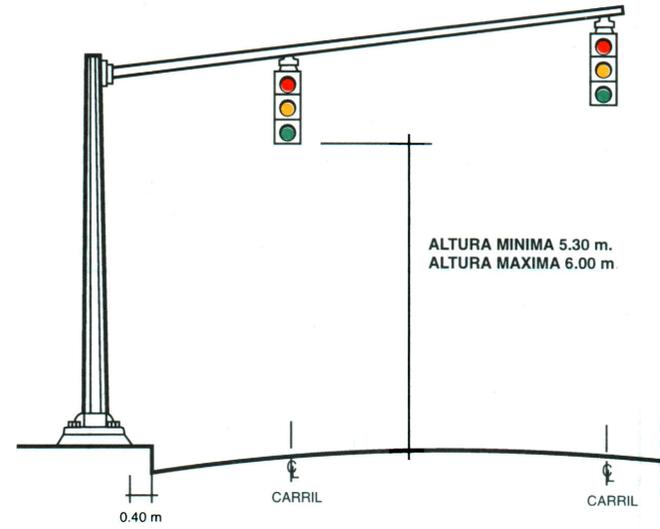
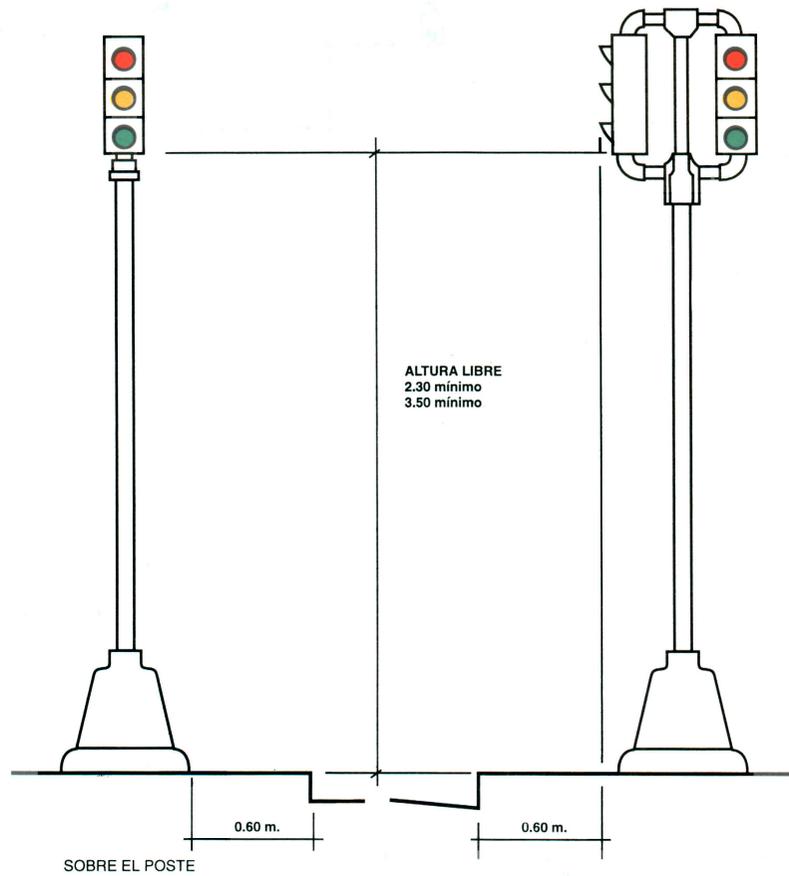
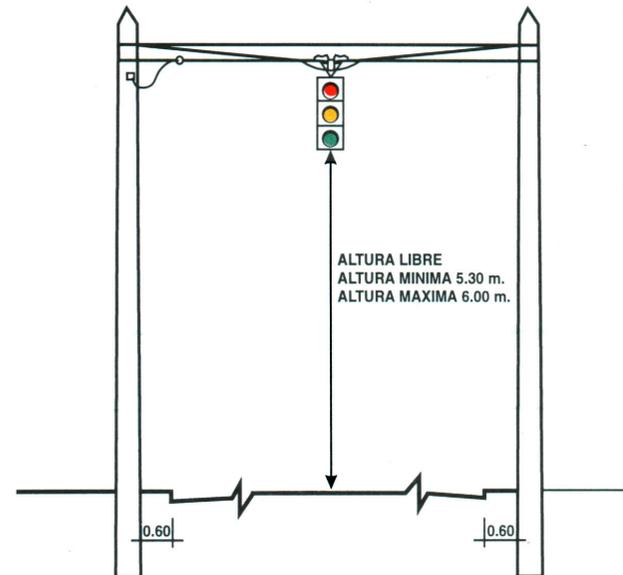


FIG. 5.5 SEMAFOROS MONTADOS EN MENSULA LARGA SUJETA A PARTE LATERAL



#### 4. Semáforos de tiempo fijo

Son una variante en el funcionamiento de una intersección semaforizada, pueden ser utilizados satisfactoriamente en los siguientes casos:

- En intersecciones donde los patrones de tránsito son relativamente estables
- Los controles de tiempo fijo se adaptan especialmente a intersecciones en las que se desee sincronizar el funcionamiento

Estos sistemas adicionalmente pueden presentar las siguientes ventajas de los controles de tiempo fijo:

- Facilitan coordinación
- No dependen de detectores
- Menor costo

#### 5. Requisitos necesarios para establecer la necesidad de un semáforo

Requisito A: volumen mínimo de vehículos

Nº de carriles de circulación por acceso en ambos accesos		Vehículos por hora en la calle principal	Vehículos por hora en el acceso de mayor volumen de la calle secundaria
Calle principal	Calle secundaria		
1	1	500	150
2 ó más	1	600	150
2 ó más	2 ó más	600	200
2 ó más	2 ó más	500	200

Requisito B: interrupción del tránsito continuo

Nº de carriles de circulación por acceso en ambos accesos		Vehículos por hora en la calle principal (total en ambos accesos)	Vehículos por hora en el acceso de mayor volumen de la calle secundaria (un solo sentido)
Calle principal	Calle secundaria		
1	1	750	75
2 ó más	1	900	75
2 ó más	2 ó más	900	100
1	2 ó más	750	100

Requisito C: volumen mínimo de peatones

Durante cada una de ocho horas de un día representativo en la calle principal se verifica los siguientes volúmenes de tránsito:

- Si entran 60 vehículos o más a la intersección (total para ambos accesos) o si 1,000 o más vehículos entran en la calle principal.

- Si durante las mismas 8 horas cruzan 50 o más peatones por hora en el cruce de mayor volumen correspondiente en la calle principal.

En zona escolar, los semáforos se justifican sí:

- Los volúmenes de peatones en un cruce escolar determinado en la calle principal exceden de 250 peatones en cada una de dos horas.
- Durante cada una de las mismas dos horas el tránsito de vehículos por el cruce escolar en cuestión excede de 800 vehículos.
- No hay semáforo a menos de 300 metros del cruce.

Los semáforos instalados bajo estas condiciones, deben ser activados por los peatones.

## 6. Términos básicos

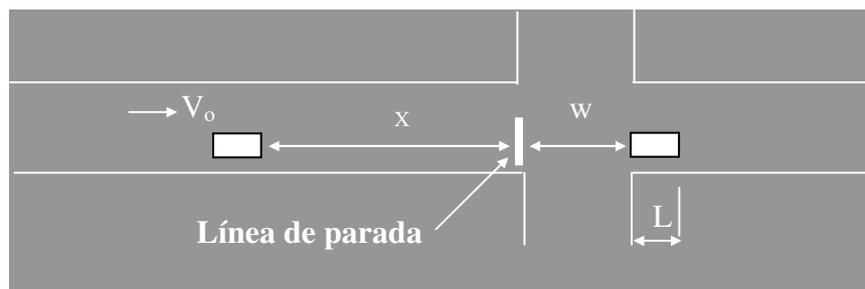
- **Ciclo ( C )** : tiempo necesario para una secuencia completa de todas las indicaciones de señal del semáforo.
- **Intervalo** : cualquiera de las diversas divisiones del ciclo durante la cual no cambian las indicaciones de la señal del semáforo.
- **Fase** : parte del ciclo asignado a una combinación de movimientos de tráfico que reciben el derecho de pasar simultáneamente durante uno o más intervalos.
- **Intervalo de despeje ( I )** : también llamado tiempo entre verdes, es el tiempo transcurrido entre el final de la luz verde en una fase y el inicio del verde en la fase siguiente.
- **Intervalo todo rojo ( AR )** : tiempo de exposición de una indicación roja para todo el tránsito. Su uso está comprobado para efectos de seguridad.
- **Desfase (offset)** : en sincronización de semáforos, es el lapso de tiempo determinado por la diferencia entre el inicio de la fase verde en una intersección y el inicio del verde en la siguiente intersección.
- **Unidad vehicular equivalente (UVE)** : unidad para considerar la presencia de diversos tipos de vehículos, distintos de autos, y movimientos a izquierda y derecha:

Movimiento / vehículo	UVE
Giro a derecha	1.10
Giro a la izquierda protegido	1.10
Giro a la izquierda permitido	1.50
Camión	1.50
Bus	1.50
Combi*	1.25
Mototaxi*	1.25

\*Establecido por Dr. Frank Navin, Estudio de Transporte en la ciudad de Piura, 1994

## 7. Zonas de dilema<sup>1</sup>

- Relacionada con la duración del tiempo entre verdes, sobre todo con la duración del ámbar.
- El problema de incertidumbre puede eliminarse seleccionando apropiadamente la duración del ámbar.
- Incorporando el movimiento del vehículo durante el tiempo percepción – reacción.



- Cuando la luz cambia a ámbar, el vehículo se encuentra a una distancia  $x$  de la línea de parada.
- El conductor debe decidir entre parar o seguir.
- La maniobra de parada requiere que el vehículo recorra no más de  $x$ .
- Despejar la intersección requiere recorrer  $(x + w + L)$ , distancia que debe ser cubierta antes que la luz cambie a rojo.

a) Para realizar con éxito la maniobra de paso del vehículo:

- Para una velocidad de aproximación  $V_o$ , un tiempo de percepción – reacción  $t_r$  y un tiempo entre verdes  $I$ :

$$x + w + L - V_o \cdot t_r < V_o (I - t_r) - 0.5 \cdot a_1 \cdot (I - t_r)^2$$

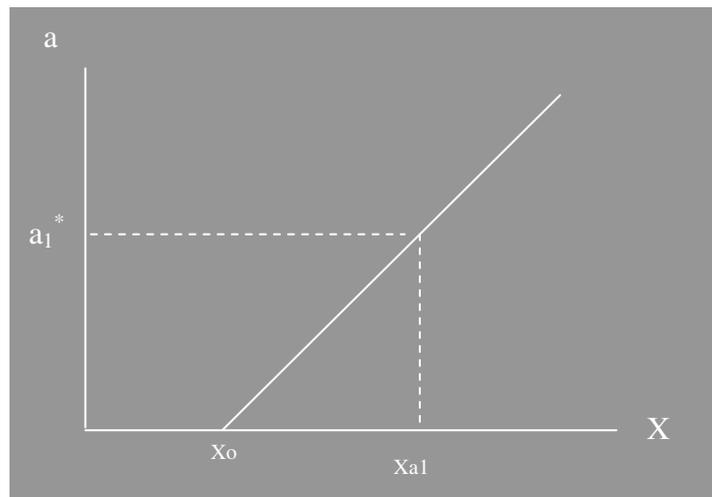
- La parte izquierda de la ecuación representa la distancia disponible para realizar la maniobra

<sup>1</sup> Gazis, 1970

- El lado derecho de la ecuación presenta la distancia recorrida con una velocidad inicial  $V_o$  y una aceleración  $a_1$  durante un intervalo  $(I - t_r)$ , es decir después del tiempo percepción – reacción
- La aceleración necesaria para pasar la intersección sin problemas es:

$$a_1 = \frac{2x}{(I - t_r)^2} + \frac{2(w - L - V_o I)}{(I - t_r)^2}$$

- Conociendo  $w$ ,  $L$ ,  $V_o$  y  $t_r$ , la relación  $x$  y  $a_1$  representa una línea recta:



- La distancia máxima entre el vehículo y la línea de parada, con la cual un vehículo puede pasar sin acelerar, será  $x_o$ :

$$x_o = V_o I - (w + L)$$

- Importante en el análisis, puesto que el vehículo que se aproxima a la velocidad límite no debe requerir acelerar para cruzar la intersección.
- $x_o$  define el punto más allá del cual un vehículo viajando a la velocidad límite no sería capaz de cruzar en ámbros en forma segura o legal.

b) Para realizar con éxito la maniobra de parada, se debe cumplir:

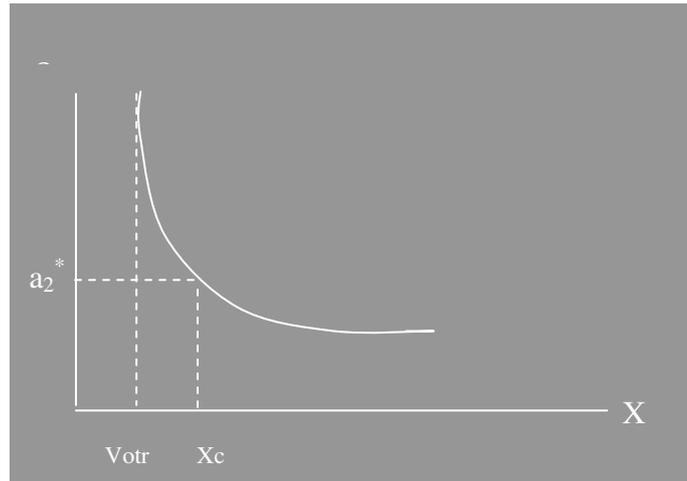
$$x - V_o t_r \geq \frac{V_o^2}{2a_2}$$

- La parte izquierda de la ecuación es la diferencia entre la distancia total menos la distancia recorrida durante el tiempo percepción – reacción con una velocidad  $V_o$ .
- La parte derecha de la ecuación es la máxima distancia de frenado disponible.

- La desaceleración más pequeña para lograr esta tarea estará dada por:
- 

$$a_2 = \frac{V_0^2}{2(x - V_0 t_r)}$$

- Conociendo  $V_0$  y  $t_r$ , la relación  $x$  y  $a_2$  puede graficarse como una parábola rectangular.
- Es razonable pues, cuando el vehículo está cerca de la línea de parada y la luz cambia a ámbar, el vehículo entrará a la intersección antes de comenzar a frenar.



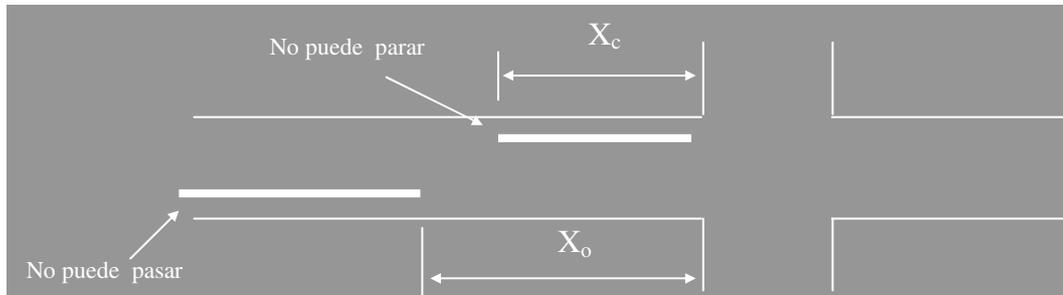
- Matemáticamente  $a_2$  es ilimitado, pero existe un valor máximo para que la desaceleración de un vehículo resulte práctica
- El límite es un poco mayor a la desaceleración que el conductor y los pasajeros consideran confortable.
- $a_2$  puede estar entre 2.4 y 3  $m/seg^2$  para pasajeros sentados
- Entre 1.2 y 1.5  $m/seg^2$  para pasajeros de pie en transporte público
- La desaceleración puede expresarse en función de la gravedad y las condiciones del pavimento:

$$a_2 = f_x \cdot g$$

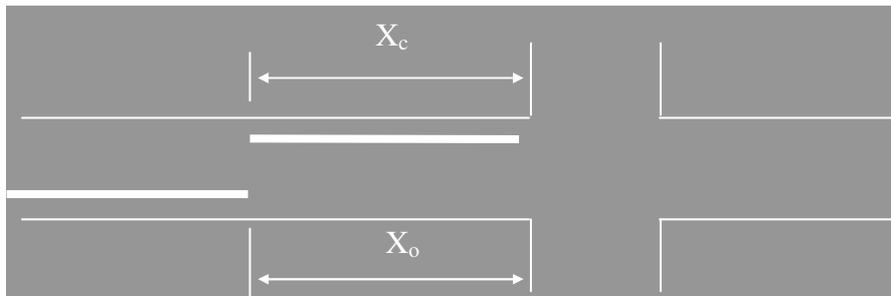
- La mínima distancia a la cual el vehículo puede detenerse con comodidad sera  $x_c$
- Distancias menores serán incómodas, inseguras o imposibles para poder detenerse

$$x_c = V_0 t_r + \frac{V_0^2}{2 f_x g}$$

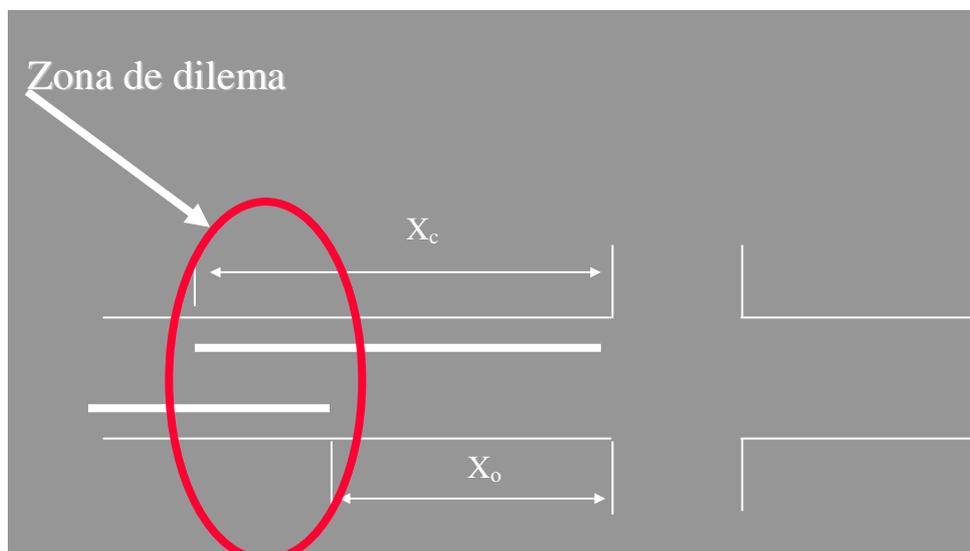
- Para un lugar en particular, las magnitudes relativas de las dos distancias críticas  $x_o$  y  $x_c$  determinan si un vehículo puede o no ejecutar, con seguridad, cualquiera de las dos maniobras
- Si  $x_c < x_o$ , el conductor puede ejecutar cualquiera de las dos maniobras sin importar donde se ubica el vehículo al momento del cambio de luz a ámbar



- Cuando  $x_c = x_o$ , representa la situación límite



- Si  $x_c > x_o$ , existirá una zona de dilema de longitud  $(x_c - x_o)$
- Un vehículo que se aproxima a la intersección al límite de la velocidad no podrá ejecutar ninguna de las dos maniobras con seguridad y comodidad



- La zona de dilema puede eliminarse de dos formas:
  - Cambiando la velocidad límite
  - Seleccionando un apropiado tiempo mínimo de duración para el ámbar
- Calcular un tiempo mínimo entre verdes I, para lo cual  $x_c = x_o$
- Igualando las ecuaciones:

$$V_o t_r + \frac{V_o^2}{2f_x g} = V_o I_{\min} - (w + L)$$

$$I_{\min} = t_r + \frac{V_o}{2f_x g} + \frac{(w + L)}{V_o}$$

## 8. Longitud del ciclo

- F. V. Webster basándose en observaciones de campo y simulación de condiciones de tránsito, determinó la longitud de ciclo óptimo de la siguiente manera:

$$C_o = \frac{1.5L + 5}{1 - \sum_{i=1}^{\varphi} Y_i}$$

$C_o$  : tiempo óptimo del ciclo (seg.)

$L$  : tiempo perdido por ciclo (seg.)

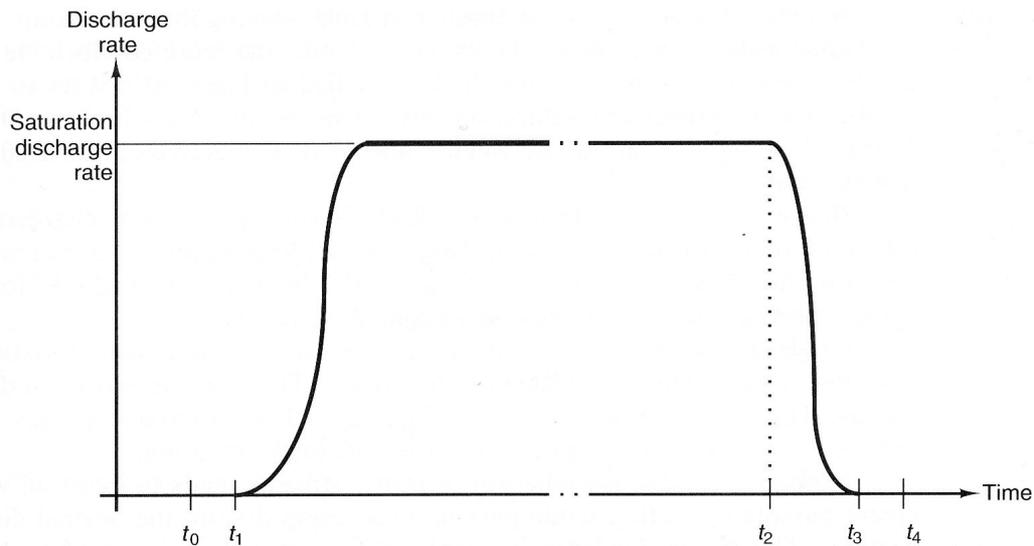
$Y_i$  : máximo valor de la relación entre el flujo actual y el flujo de saturación para el acceso o movimiento o carril crítico de la fase  $i$

$\varphi$  : número de fases

## 9. Flujo de saturación y tiempo perdido

- R. Akcelik estudió la capacidad de intersecciones con semáforos basado en flujos de saturación, vehículos equivalentes, tiempo perdido y verde efectivo
- Cuando el semáforo cambia a verde, el paso de los vehículos que cruzan la línea de parada se incrementa rápidamente a una tasa llamada **flujo de saturación**. Los actuales estándares en el Highway Capacity Manual, utilizan un flujo de saturación ideal de 1900 pc/hg/ln, para ambos casos: carril simple o multicarril.

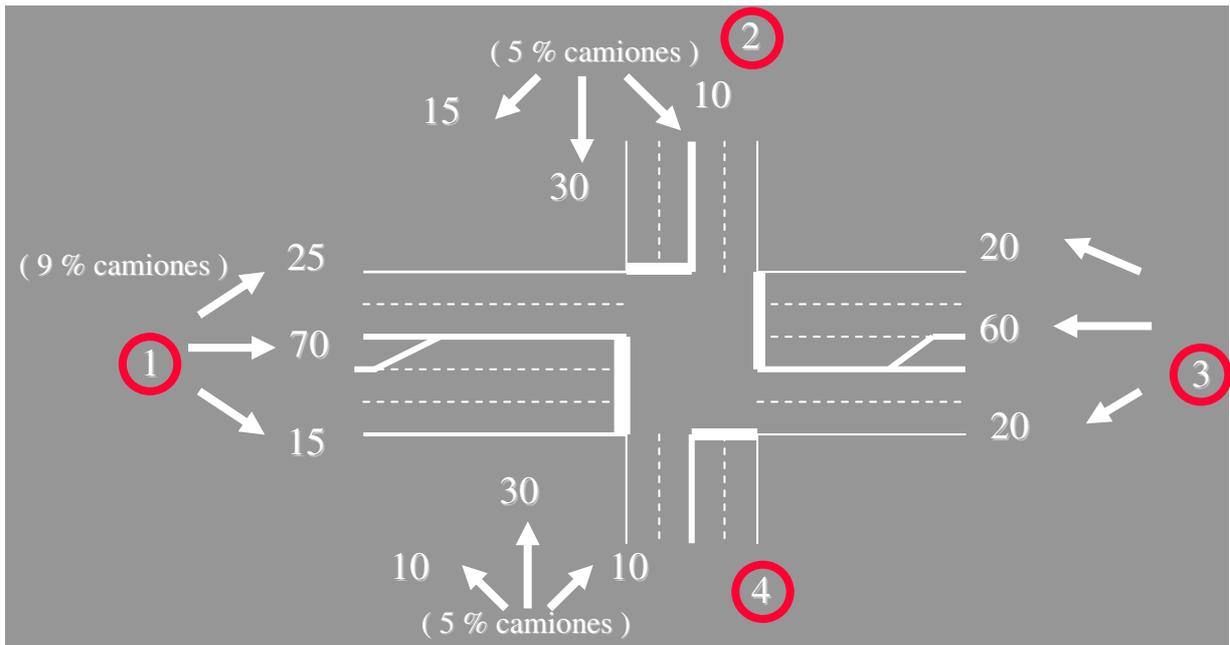
- Esa tasa permanece constante hasta que la fila de vehículos se disipe o hasta que termine el verde
- Mientras los vehículos aceleran hasta alcanzar una velocidad de marcha normal, la tasa de vehículos que cruzan la línea es menor durante los primeros segundos
- Lo mismo sucede durante el periodo posterior a la terminación del verde



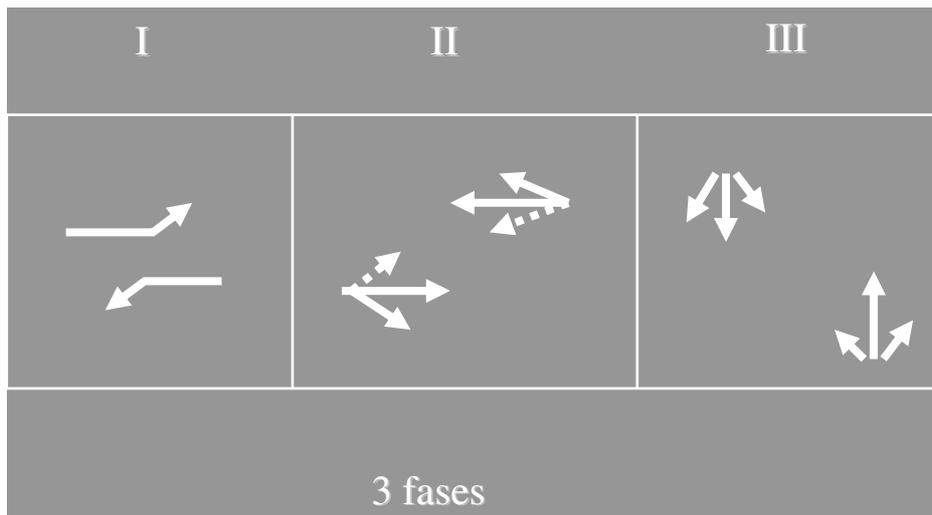
**Figure 5.4.3** Concept of saturation flow.  $t_0$ , beginning of green;  $t_1$ , first vehicle crosses stop-line;  $t_1-t_0$ , startup delay;  $t_2$ , beginning of amber (end of green);  $t_3$ , last vehicle to discharge during this cycle;  $t_3-t_2$ , amber utilization;  $t_4$ , end of amber (beginning of red);  $t_2-t_1$ , signal green time;  $t_3-t_1$ , effective green time.

### Ejemplo

- Todos los carriles de 12 pies (3.65 metros)
- Velocidad de aproximación en ambas direcciones: 50 Km/hr
- Flujo de saturación: 1800 UVE/hr/carril
- Tiempo perdido por fase: 5 segundos



- De acuerdo con los volúmenes de tránsito, se decide el número de fases
- Se comienza con el sistema convencional (2 fases)
- Luego se analizan los giros a la izquierda
- Evaluar la posibilidad geométrica
- Cuando el volumen es mayor o igual a 200 vehículos por hora, se recomienda fase exclusiva



Convertir volúmenes mixtos a vehículos equivalentes (UVE):

acceso	izquierda	De frente	derecha
1	288	732	172
2	154	308	169
3	230	627	230
4	154	308	112

- Calcular el tiempo entre verdes, I, para cada fase
- En el caso de fase protegida, no se calcula tiempo entre verdes
- Solamente se toma el valor del ámbar promedio

FASE I: no se calcula

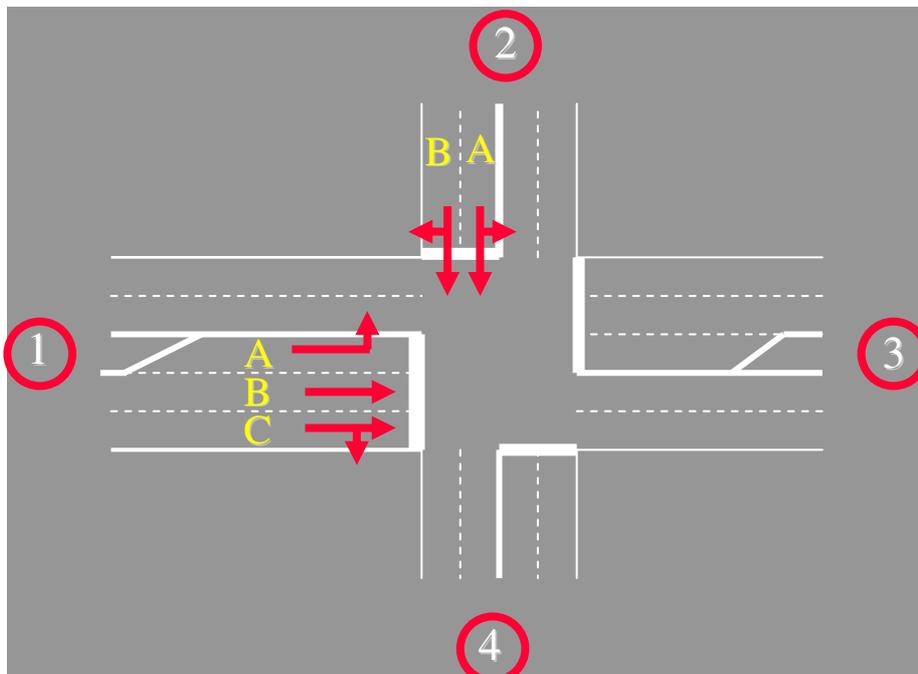
$$\text{FASE II: } I = 1 + \frac{(50/3.6)}{2 \times 0.33 \times 9.81} + \frac{(4 \times 12 + 20) \times 0.3048}{50/3.6} = 4.7 \text{ segundos} = 5 \text{ segundos}$$

$$I = A + AR \quad (4 A + 1 AR)$$

$$\text{FASE III: } I = 1 + \frac{(50/3.6)}{2 \times 0.33 \times 9.81} + \frac{(5 \times 12 + 20) \times 0.3048}{50/3.6} = 4.9 \text{ segundos} = 5 \text{ segundos}$$

$$I = A + AR \quad (4 A + 1 AR)$$

- Para aplicar el método de WEBBSTER, se determina primero los volúmenes críticos por carril
- Primero se fija la direccionalidad de uso



Acceso	Carril	Fase	volumen
	A	I	288
	B	II	$(732 / 2) = 366$
	C	II	$(732 / 2) + 172 = 538$
	A	III	$154 + (308 / 2) = 308$
	B	III	$169 + (308 / 2) = 323$
	A	I	230
	B	II	$(627 / 2) = 314$
	C	II	$(627 / 2) + 230 = 544$
	A	III	$154 + (308 / 2) = 308$
	B	III	$112 + (308 / 2) = 266$

- Volúmenes críticos:

$$\text{FASE I : } 288 \qquad Y1 = 288 / 1800 = 0.16$$

$$\text{FASE II : } 288 \qquad Y2 = 544 / 1800 = 0.30$$

$$\text{FASE III : } 288 \qquad Y3 = 323 / 1800 = 0.58$$

$$\Sigma Y = 0.18$$

$$C_o = \frac{1.5(5 \times 3) + 5}{1 - 0.64} = 76.38 \quad \longrightarrow \quad 80 \text{ segundos}$$

- Distribución del ciclo por fases:

$$80 (0.16 / 0.64) = 20 \text{ segundos ( 16 G + 4 A )} \qquad \text{FASE I : G + A =}$$

$$80 (0.30 / 0.64) = 38 \text{ segundos ( 33 G + 4 A + 1 AR )} \qquad \text{FASE II: G + I =}$$

$$80 (0.18 / 0.64) = 22 \text{ segundos ( 17 G + 4 A + 1 AR )} \qquad \text{FASE III: G + I =}$$

- Diagrama de fases:

