

# CAPACIDAD DE UNA BANDA DE TRAFICO

Por MIGUEL MARTÍNEZ CATENA, Ingeniero de Caminos.

*Presenta el autor muy curiosos e interesantes datos acerca de las enormes economías que pueden obtenerse en los vehículos automóviles, mediante la adopción de velocidades convenientes y la regulación racional de las paradas en la circulación urbana, deduciéndolos todos de las fórmulas que presentó el mismo en su artículo de enero de 1947, en nuestra REVISTA, y comparándolos con los datos a conocer en publicaciones técnicas extranjeras.*

En el artículo que publicamos en la REVISTA, de enero de 1947 con el título de "Algunas ideas sobre circulación urbana", se dedujeron unas normas para la ordenación y mejora del tráfico urbano, obteniendo, para ello, las fórmulas que daban la velocidad comercial, tanto en las calles de doble como de única dirección, en función de la velocidad máxima y de la organización que se haga de las paradas reglamentarias.

Y vamos ahora a hacer una aplicación práctica de ellas, deduciendo la capacidad de una banda de tráfico, de una calle.

Supongamos que por ella circula una serie de vehículos de longitud  $L$  metros, a la velocidad  $V$  metros por segundo y separados entre sí  $d$  metros. La intensidad de circulación  $I$  en un punto, que es el número de vehículos que pasan por él en un segundo vale:

$$I = \frac{V}{L + d} \quad [1]$$

Como ya dijimos, la separación  $d$  entre vehículos se reduciría, teóricamente, a cero, si se pudiese conseguir que al frenar uno de ellos, por la presencia de un obstáculo, todos los demás frenasen al mismo tiempo. Pero en la práctica, desde que un conductor observa que debe frenar hasta que hace actuar el freno, transcurre un cierto tiempo,  $t_r$ , que llamaremos tiempo de reacción, durante el cual el vehículo recorre un espacio  $t_r V$ . Y como además, también en la práctica, conviene dar un cierto margen de seguridad y los vehículos ya parados guardan entre sí una cierta separación, resultará que:

$$d = t_r V + S \quad [2]$$

Para  $t_r$ , factor íntimamente unido a la psicología y carácter de cada conductor, se han fijado muy distintos valores por los diferentes técnicos que han estudiado este asunto. Y así vemos que, en las Memorias de la XXVIII Conferencia Anual de Caminos de la Universidad de Michigan, el ingeniero Sr. Normann, da en un estudio sobre "Capacidad de los caminos", una tabla en la que 24 técnicos fijan valores de  $t_r$ , variables entre 0,50 y 2 segundos. Nosotros, de acuerdo con la mayoría y con los estudios últimamente realiza-

dos, fijaremos un valor para el tiempo de reacción  $t_r$  de 1 segundo.

Lo mismo que para el tiempo  $t_r$ , ocurre para la constante  $S$ , cuyos valores, en la tabla anteriormente citada, varían entre 4 y 7,60 m. Nosotros le fijaremos el de 5 m.

Por consiguiente, poniendo estos valores en [2]:

$$d = V + 5,$$

y sustituyendo en [1], la intensidad de tráfico  $I$  será:

$$I = \frac{V}{L + V + 5} \text{ vehículos/segundo.}$$

O lo que es igual:

$$I_h = \frac{3600 V}{L + 5 + V} \text{ vehículos/hora,} \quad [3]$$

que es la ecuación de una hipérbola equilátera que pasa por el origen de coordenadas y que tiene una asíntota paralela al eje de las  $V$ ,  $I_h = 3600$ , valor máximo a que tiende la capacidad de tráfico cuando la velocidad crece hacia infinito.

La relación entre el número de vehículos por hora,  $I_h$ , y la velocidad,  $V$ , para diferentes valores de la longitud media de aquéllos, está indicada en la figura 1.<sup>a</sup>, en la que se han representado las curvas correspondientes para las longitudes de 4, 5,50, 8 y 10 metros.

Observando estas curvas, se ve que una disminución de la velocidad de circulación puede reducir a la mitad la capacidad horaria de una banda de tráfico, especialmente cuando se trata de vehículos largos; pero a partir de los 40, y sobre todo de los 50 Km. por hora, el aumento que se obtiene de la capacidad es pequeño y en modo alguno compensa los inconvenientes y perjuicios que acarrearán estas mayores velocidades dentro de los núcleos urbanos. Se puede afirmar que, despreciando paradas y cruces, la máxima capacidad horaria de una banda de tráfico de una calle, compatible con el grado de seguridad necesario, es de 2000 vehículos, que corresponde a una velocidad de 40 Km./hora.

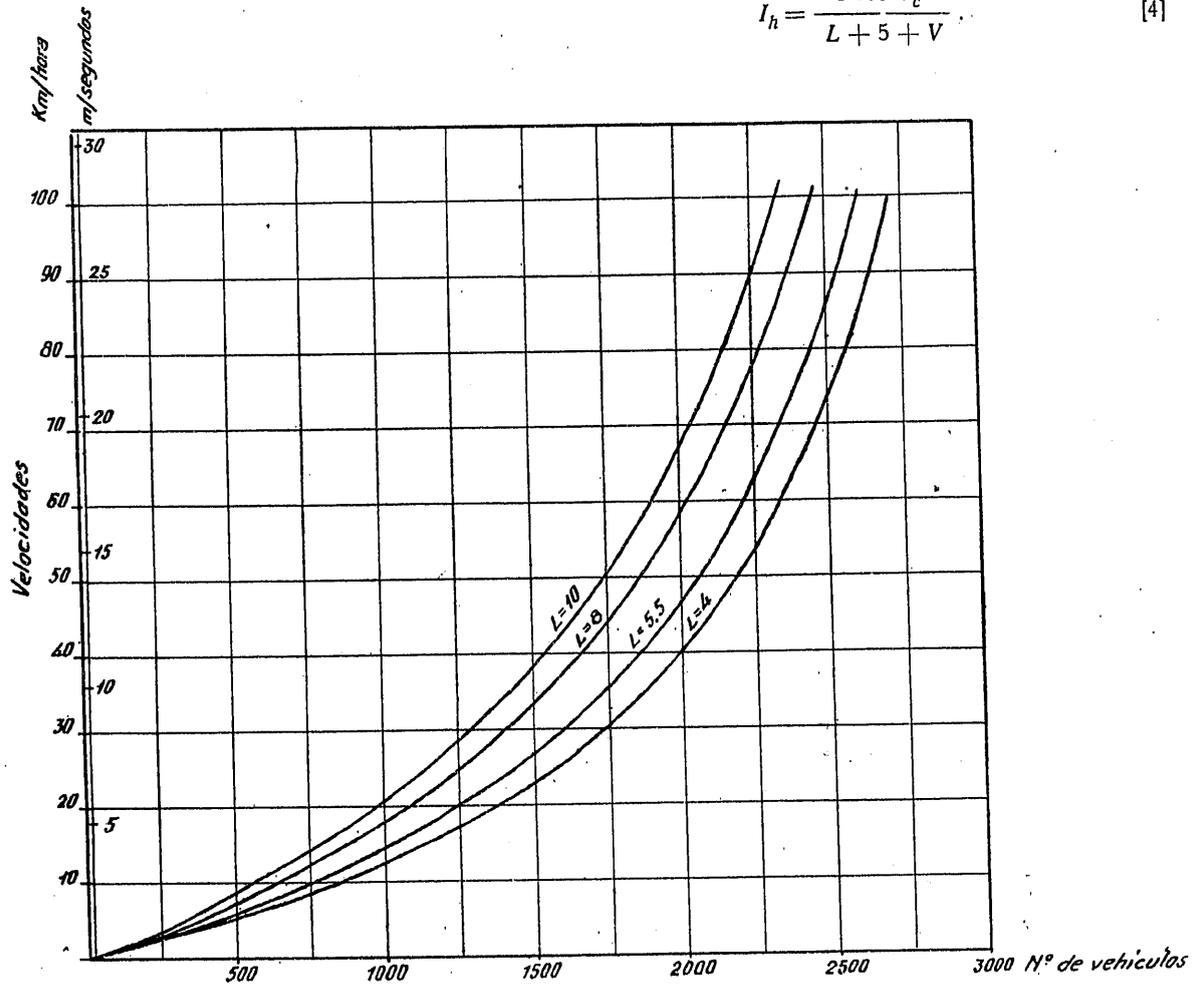
Ahora bien: las condiciones ideales de una corriente de tráfico sin paradas, obstrucciones ni cruces, para una longitud indefinida de vía o período ilimitado de

tiempo, no se encuentran frecuentemente en la práctica. Lo usual es que existan cruces, que requieren la parada de los vehículos durante cierto espacio de tiempo para dar paso a los peatones y a los vehículos que proceden de las calles afluentes. Es lo que ocurre

es la suma de la longitud de los vehículos y de la separación entre ellos, permanece el mismo, puesto que esta separación es función siempre de la velocidad máxima.

Por consiguiente:

$$I_h = \frac{3600 V_c}{L + 5 + V} \quad [4]$$



$I_h = \frac{3600V}{L+5+V}$  Figura 1.ª

en las calles de las zonas céntricas de las grandes poblaciones y, por tanto, el estudio de la influencia de esas paradas reglamentarias es fundamental para buscar soluciones prácticas al problema de las congestiones de tráfico que en ellas se originan.

Veamos cuál es la capacidad de una banda de tráfico de una de estas calles, en las que los vehículos están obligados a realizar una serie de paradas reglamentarias, debidas a la ordenación que en ella se haya hecho del tráfico. Para determinarla, basta sustituir en el numerador de la fórmula [3], que da la intensidad horaria en un punto, la velocidad máxima,  $V$ , por la velocidad comercial  $V_c$ ; el denominador, que

Y como  $V_c$  obtuvimos (\*) que valía:

$$V_c = \frac{V}{1 + h(1 - k)}$$

$$V_c'' = \frac{V}{1 + h}$$

$$V_c''' = \frac{V}{1 + h(1 + k)}$$

$$V_{c1}''' = \frac{V}{1 + h(1 + k)}$$

(\*) Véanse págs. 27 a 30 de la REVISTA, de enero de 1947.

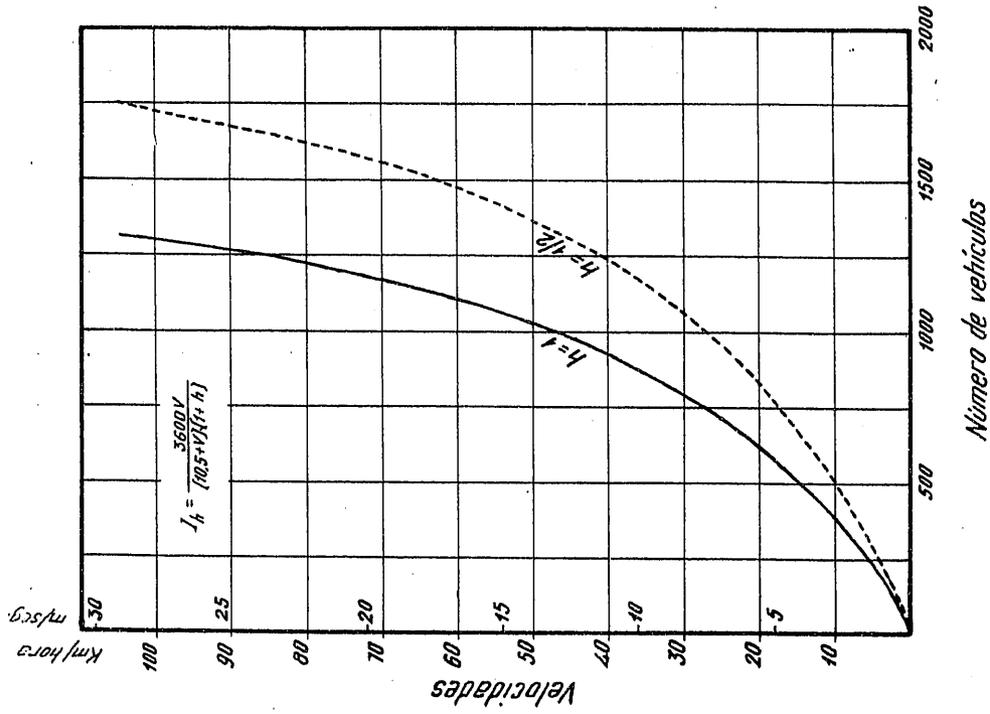


Figura 3.ª

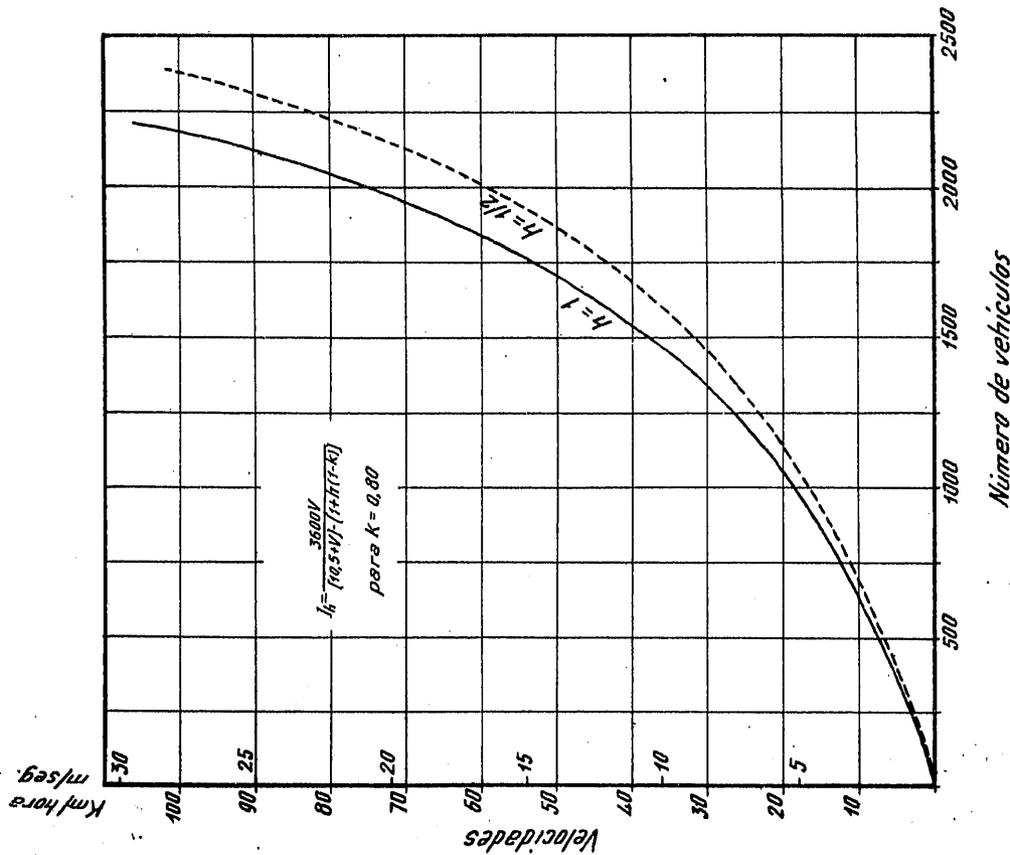


Figura 2.ª

según se trate de una calle de dirección única o de una de doble dirección con señales sincronizadas o decaladas, respectivamente, sustituyendo en [4] se obtendrá:

$$I'_h = \frac{3600 V}{(L + 5 + V) [1 + h(1 - k)]}; \quad [5]$$

$$I''_h = \frac{3600 V}{(L + 5 + V) (1 + h)}; \quad [6]$$

$$\left. \begin{aligned} I'''_h &= \frac{3600 V}{(L + 5 + V) [1 + h(1 - k)]}; \\ I''''_h &= \frac{3600 V}{(L + 5 + V) [1 + h(1 + k)]}; \end{aligned} \right\} [7]$$

en las que, como dijimos (\*),  $k$  es el coeficiente de decalaje de apertura y cierre de cada señal respecto a la anterior, que, multiplicado por el tiempo que tarda un vehículo en recorrer a la velocidad máxima  $V$  la separación entre dos señales consecutivas, da el decalaje absoluto en tiempo entre ellas, y  $h$  es la relación entre el tiempo que permanecen cerradas y el que están abiertas a la circulación por la calle de que se trate.

La expresión [5] corresponde a una calle de dirección única. La [6], a una de doble dirección con las señales sincronizadas. Y las [7] a una de doble dirección con las señales decaladas, correspondiendo la primera de éstas a una banda del tráfico que tiene el mismo sentido que el de apertura y cierre de dichas señales, y la segunda, a una banda del tráfico de sentido opuesto al anterior.

Todas ellas son hipérbolas equiláteras, con las asíntotas paralelas a los ejes de coordenadas, y están representadas en las figuras 2.<sup>a</sup>, 3.<sup>a</sup> y 4.<sup>a</sup>, para una longitud media de los vehículos de 5,50 metros, un coeficiente de decalaje de 0,80 y para valores de  $h$  iguales a 1/2 y 1.

(El ingeniero americano Sr. Jacobson, en un estudio que hizo sobre esta materia y que publicó en la Revista *Engineering*, de noviembre de 1946, llegaba a unas curvas en las que se observa el "hecho sorprendente", según él mismo dice, de que el máximo de capacidad está por debajo de las mayores velocidades. Esto es consecuencia de que parte del error de establecer para la distancia entre paradas consecutivas, que como vimos (\*) es función de la velocidad máxima y de la organización de las señales, valores fijos e independientes de dicha velocidad. En este supuesto, al aumentar la velocidad de los vehículos disminuye el tiempo que emplean en recorrer dichas distancias, durante el cual están abiertas al tráfico las señales. Y como la velocidad comercial es función de ese tiempo

de valor decreciente y del de duración del período de cierre de las mismas, que el autor supone que permanece constante, llega un momento, para un determinado valor de la velocidad máxima, a partir del cual y por la influencia del segundo factor o tiempo de parada de los vehículos, disminuye dicha velocidad comercial y, por tanto, la capacidad de tráfico de la

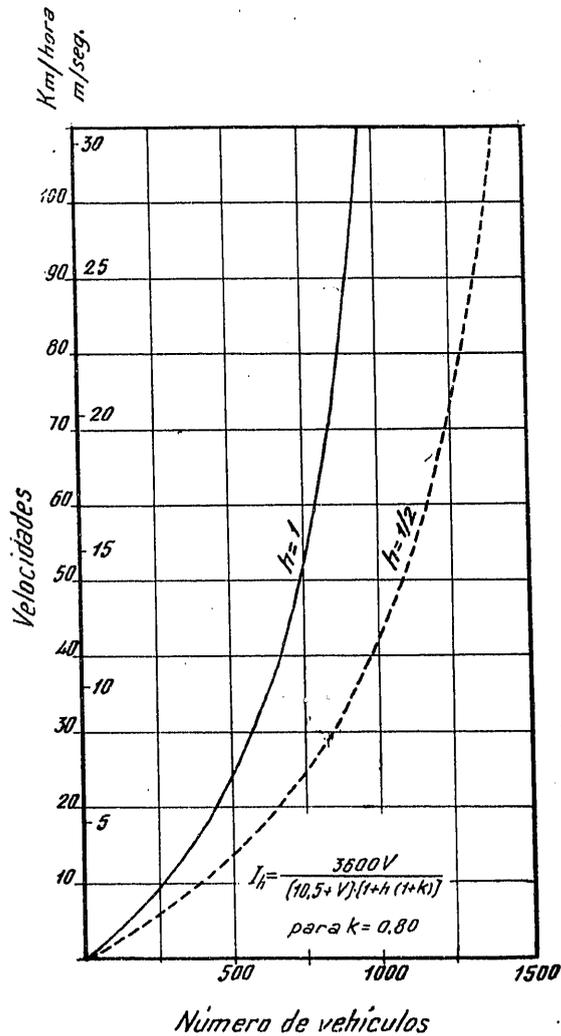


Figura 4.<sup>a</sup>

banda. Hubiera bastado poner aquellas distancias, supuestas fijas, en función de la velocidad máxima y del tiempo, para llegar a unas curvas de la misma clase que las que hemos deducido.)

Examinando las figuras 2.<sup>a</sup>, 3.<sup>a</sup> y 4.<sup>a</sup>, se desprende lo siguiente:

1.º Del mismo modo que en el caso teórico de no existir paradas, una disminución de la velocidad de circulación puede reducir a la mitad la capacidad horaria de una banda de tráfico; pero el aumento de ella que se obtiene a partir de los 40 y, sobre todo, de los

(\*) Véanse páginas 27 a 30 de la REVISTA, de enero de 1947.

50 Km. por hora es pequeño en comparación con los perjuicios que podrían ocasionar mayores velocidades dentro de los núcleos urbanos.

2.º Una disminución del tiempo que permanecen cerradas las señales, hasta un valor igual a la mitad del que están abiertas, aumenta la capacidad de tráfico de la banda correspondiente, para una velocidad de 40 Km./hora, en la proporción de un 10 a un 40 por 100, según se trate de calles de una o de doble dirección.

3.º En una banda de una calle de dirección única se puede conseguir una capacidad horaria de 1 525 vehículos, que corresponde a la velocidad máxima de 40 Km./hora, un coeficiente de decalaje 0,80 y un tiempo de duración del cierre de las señales igual al que permanecen abiertas. Si el tiempo de duración del cierre se puede reducir a la mitad, la capacidad sería de 1 700 vehículos.

4.º En cambio, en una banda de una calle de doble dirección, las capacidades máximas que se pueden obtener con las señales sincronizadas y con valores de los demás factores iguales a los citados antes, son de 925 y 1 250 vehículo por hora, respectivamente. Sin embargo, también en una banda de una de estas calles se pueden conseguir las mismas capacidades horarias de 1 525 y 1 700 vehículos que en las calles de dirección única, bastando para ello decalar la apertura y cierre de las señales en la misma dirección que la del tráfico de la banda de que se trate; pero este aumento de las capacidades en una dirección se obtiene a costa de las correspondientes a las bandas de opuesta dirección, que se reducen a 650 y 975 vehículos por hora, respectivamente.

Por tanto, una mala organización de las señales de tráfico, motivada de un modo permanente por el defectuoso reglaje de ellas (sincronización, decalaje, tiempo de duración de las paradas, etc.) o accidentalmente por la actuación de agentes que en su cometido obran libremente, prescindiendo de toda norma y sin tener en cuenta para nada la existencia de las demás señales, pueden originar grandes congestiones en las horas de mayor tráfico y, en todo caso, paradas inútiles que ocasionan indudables molestias y perjuicios de índole económica al público.

La cuantía de estos perjuicios, debidos al aumento de consumo de gasolina, mayor desgaste de neumáticos, frenos, dirección y motor y a la inmovilización del material que se ocasiona en las paradas, es elevadísima.

La figura 5.ª, tomada de las Memorias de la XXX Conferencia Anual de Caminos de la Universidad de Michigan, muestra el consumo actual de gasolina para diversas velocidades cuando son necesarias paradas frecuentes. En ella se observa que a la velocidad de 30 millas por hora, cuatro paradas por milla (que es bastante corriente en nuestras poblaciones), reducen a 15 millas la longitud de 22 que se puede recorrer,

sin parada ninguna, con un galón de gasolina; es decir, que se aumenta el consumo unitario en un 50 por 100. Y si el número de paradas por milla sube a 8, el recorrido que se podría hacer con la misma cantidad de gasolina sería de 11 millas solamente, lo que supone duplicar el consumo unitario.

Las cifras anteriores bastarían por sí solas para juzgar sobre la magnitud de los perjuicios que se ocasionan. Pero para darse una idea de su importancia total, citaremos el caso de París (recogido por nuestro compañero el Sr. Pellico en el artículo "Restricciones y Economías", que publicó la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, de diciembre de 1947), en el que, para una circulación diaria de unos 165 000 vehículos, se originó un gasto adicional, debido a las interrupciones del tráfico, que ascendía a más de mil millones anuales, teniendo solamente en cuenta el coste de la gasolina (2,25 francos/litro) y el del tiempo de inmovilización de los vehículos.

La reducción al mínimo de estas cantidades, gasta-

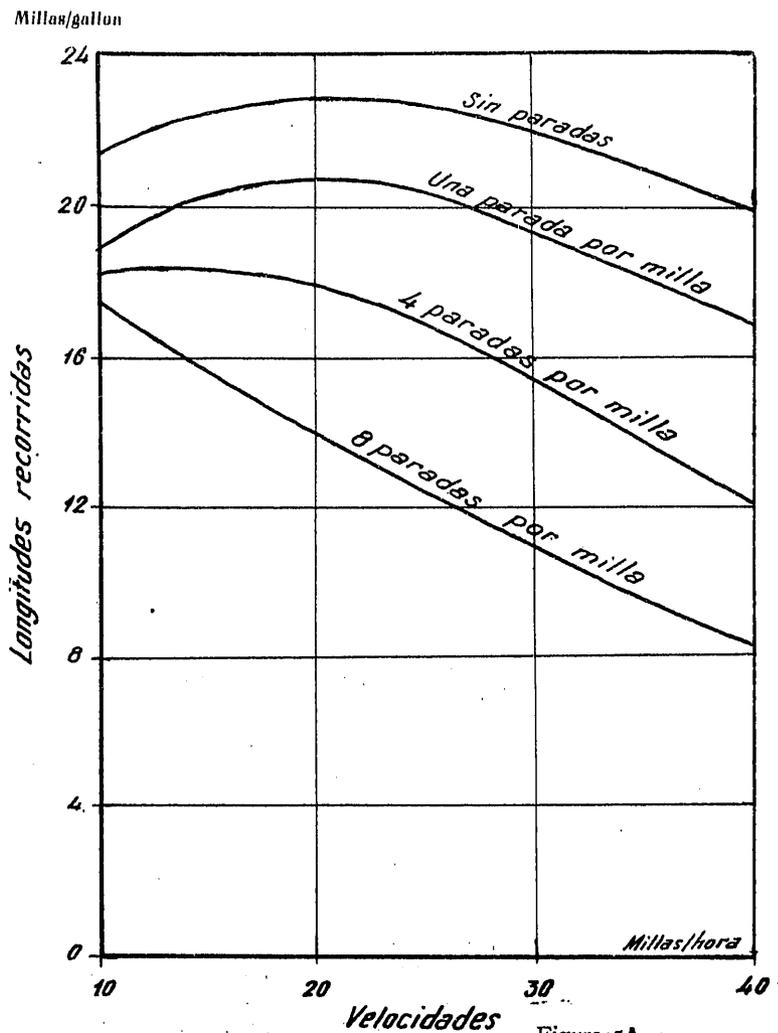


Figura 5.ª

das sin utilidad alguna, es, pues, fundamental, sobre todo en una época como la que atravesamos, de restricciones y economías. Y ello justifica la necesidad ineludible de realizar un estudio a fondo y una reorganización de las vías de circulación intensa de las grandes

ciudad de los vehículos;  $t$ , el tiempo que emplean en recorrer esa distancia;  $d = k t$ , el decalaje de apertura y cierre de las señales;  $T$ , el tiempo que permanecen abiertas, y  $h T$ , el que están cerradas.

Supuestas abiertas las dos señales y la fila de ve-

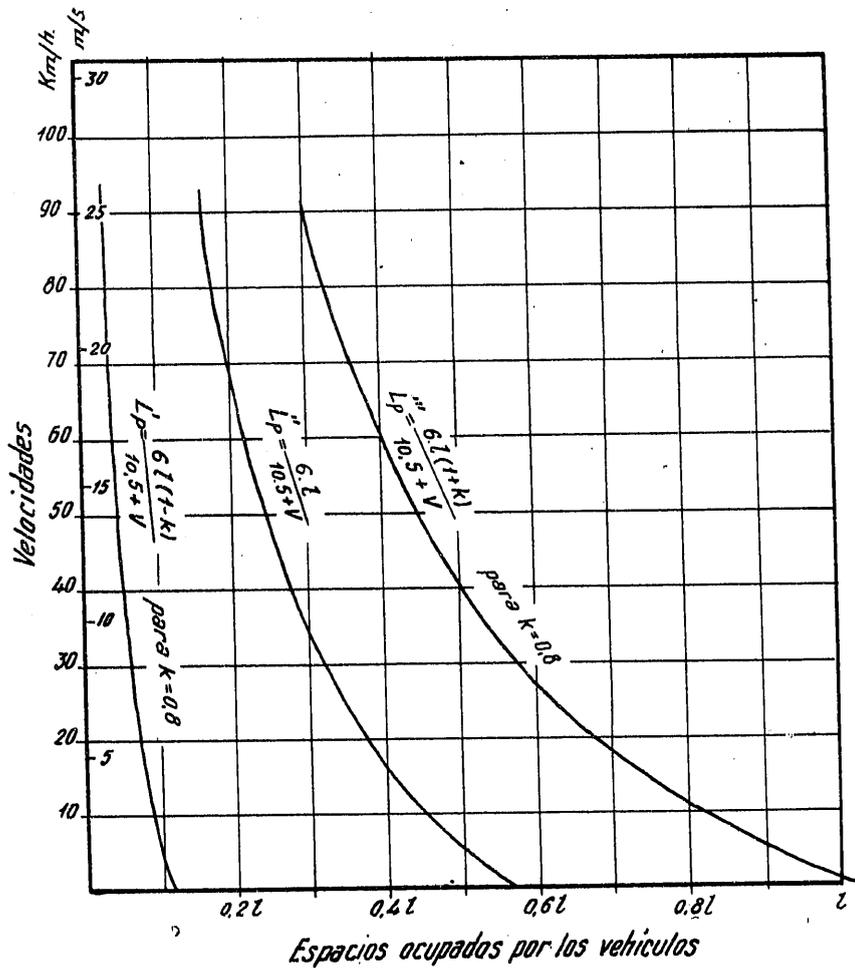


Figura 6.<sup>a</sup>

ciudades, y sobre todo de las señales de tráfico existentes en ellas, que se deben modernizar, dotar de la mayor flexibilidad y disponer de modo que reduzcan el número y duración de las paradas.

\*\*\*

Para terminar, vamos a deducir el número de vehículos que se detendrán ante una señal al cerrarse ésta, y el espacio necesario para su reunión; cuestión que está íntimamente ligada con el problema que estudiamos.

Tomemos dos señales consecutivas cualesquiera de la banda de que se trata, situadas a una distancia  $l$ . Sean, como hemos dicho anteriormente,  $V$ , la velo-

hículos en régimen normal, el número de éstos existente entre aquéllas es:

$$N = \frac{l}{L + V + 5} \tag{8}$$

Si la banda corresponde a una calle de dirección única, con señales decaladas, al cerrar la primera continuarán pasando vehículos por la segunda durante un tiempo igual al decalaje. Y el total de ellos que pasarán será el producto de la intensidad de tráfico,  $I$ , por ese tiempo. O sea:

$$n = I d = \frac{V}{L + V + 5} k t.$$

Pero como  $Vt = l$ , resultará:

$$n = \frac{kl}{L + V + 5}$$

Y el número de vehículos que se detendrán será:

$$N'_p = N - n = \frac{l}{L + V + 5} - \frac{kl}{L + V + 5} = \frac{l(1-k)}{L + V + 5}$$

Suponiendo que una vez parados la separación entre ellos sea de 0,50 m., la longitud que ocuparán será:

$$L'_p = N'_p(L + 0,50) = \frac{l(1-k)(L + 0,5)}{(L + V + 5)}$$

Las dos expresiones anteriores para una longitud media de los vehículos  $L = 5,5$  m., son:

$$\left. \begin{aligned} N'_p &= \frac{l(1-k)}{10,5 + V} ; \\ L'_p &= \frac{6l(1-k)}{(10,5 + V)} \end{aligned} \right\} \quad [9]$$

Si la banda de que se trata es de una calle de doble dirección con señales sincronizadas, al cerrarse la primera se cerrará también la segunda, y ante ésta se detendrán todos los vehículos existentes entre las dos. Es decir, que

$$\left. \begin{aligned} N''_p &= N = \frac{l}{L + V + 5} = \frac{l}{10,5 + V} ; \\ L''_p &= N''_p(L + 0,5) = \frac{6l}{(10,5 + V)} \end{aligned} \right\} \quad [10]$$

Y por último, si en la calle de doble dirección se decalan las señales en un determinado sentido, las expresiones que dan el número de vehículos que se detienen ante una de ellas, y el espacio ocupado por los mismos son las [9] para las bandas que tienen el sentido de tráfico igual al del decalaje. Y para las de sentido opuesto, mediante un razonamiento análogo, se deduce:

$$\left. \begin{aligned} N'''_p &= \frac{l(1+k)}{10,5 + V} ; \\ L'''_p &= \frac{6l(1+k)}{10,5 + V} \end{aligned} \right\} \quad [11]$$

Las fórmulas [9], [10] y [11] corresponden también a hipérbolas equiláteras, una de cuyas asíntotas es el eje de las  $V$ . Y la relación entre el espacio ocupado por los vehículos parados,  $L_p$ , y la velocidad, está indicada en la figura 6.<sup>a</sup>, en la que se han representado las curvas correspondientes a los tres casos estudiados, para  $k = 0,80$ .

Como se observa, al aumentar la velocidad, disminuye  $L_p$ , lo que demuestra que también desde este punto de vista es conveniente dar a la circulación la mayor rapidez posible, pues al reducirse el espacio necesario para la reunión de los vehículos detenidos ante las paradas, se evitan, o disminuyen al menos, las congestiones de tráfico.

Las expresiones deducidas dan el espacio ocupado únicamente por la parte del tráfico principal detenido ante las paradas, prescindiendo de los tráficos afluentes. Para tener en cuenta éstos, si es conocida su intensidad,  $I_a$ , basta añadir a las fórmulas anteriores el producto de ella por el tiempo  $hT$  que permanecen cerradas, y por  $L + 0,5 = 6,00$  m. que ocupa cada vehículo.

Es decir, que las fórmulas que dan el espacio total ocupado, ante una parada, por los vehículos detenidos en ella, procedentes tanto del tráfico de la calle que se estudia como de las afluentes, son las siguientes para los mismos tres casos anteriores:

$$L'_p = \frac{6l(1-k)}{10,5 + V} + 6 \times I_a \times hT;$$

$$L''_p = \frac{6l}{10,5 + V} + 6 \times I_a \times hT;$$

$$L'''_p = \frac{6l(1+k)}{10,5 + V} + 6 \times I_a \times hT.$$

Estas fórmulas, unidas a las [5], [6] y [7], que dan las intensidades del tráfico, y a las que obtuvimos en nuestro artículo anterior para las longitudes máximas que pueden recorrer los vehículos sin parada alguna, permiten, en cada caso y una vez conocidos los datos del problema planteado, determinar los valores de  $h$ ,  $k$  y  $T$  que resuelvan el mismo, de modo que se obtenga una circulación segura, fluida, y en la que se haya reducido al mínimo el número y duración de las paradas.

