

Consideraciones acerca del seguimiento de los vehículos



Sandro Rocci y Manuel G. Romana.
Universidad Politécnica de Madrid.

Resumen

A partir de un modelo muy simple de circulación de vehículos en fila por un solo carril, los autores relacionan la intensidad de ese tráfico con la velocidad, la separación entre los vehículos y el intervalo temporal entre ellos. Se examinan, a continuación, distintas disposiciones legales relativas a la separación mínima cuando se circula por un túnel, llegando a varias conclusiones: el Reglamento general de circulación resulta inaplicable (era mejor el Código de la circulación de 1934), y la Directiva europea sobre

seguridad en túneles es razonable

Palabras clave: túnel, seguimiento, separación.

1 Principios básicos

En la Ingeniería del tráfico se distinguen dos situaciones extremas que son sencillas de modelar mediante ecuaciones; pero hay que reconocer que la realidad está prácticamente siempre en una situación intermedia. Estas situaciones extremas son:

- Circulación con intervalos constantes (determinista y no estadística).

- Llegadas aleatorias (distribución de Poisson).

Diferentes autores proponen otras distribuciones teóricas para modelar situaciones con intensidades eleva-

das. May (1990) propone la Pearson tipo III⁽¹⁾, mientras que Chandra (2001) ha sugerido la distribución *hyperlang*.

1.1. Circulación con intervalos constantes

Se considera una situación con una sola fila de vehículos, cada uno de ellos de la misma longitud L (m), que circulan todos ellos a una velocidad uniforme V (km/h), separados por un espacio libre s (m) también constante.



(1) La Pearson III suele dar buenos resultados, pero conviene establecer un intervalo t mínimo, que se toma habitualmente igual a 0,5 s..

El intervalo **temporal**⁽²⁾ t (s) es también constante, y está determinado por la ecuación siguiente:

$$t = \frac{L}{V}$$

Este tipo de circulación es estacionario, y sólo puede plantearse para situaciones en las que no haya cambios de carril. La intensidad horaria I (veh./h) de esta corriente de tráfico estará dada por

$$I = \frac{V}{L} \cdot t$$

1ª conclusión: En la situación analizada, la intensidad del tráfico que pasa por el carril sólo depende del intervalo entre los vehículos, y no exclusivamente de su velocidad, longitud o separación⁽³⁾. Estas intensidades son bajas para un túnel urbano.

La densidad D (veh./km) de esta corriente teórica de tráfico está dada por

$$D = \frac{V}{L} \cdot t$$

2ª conclusión: Para la densidad máxima compatible con la capacidad ($D = 28$) según el Manual de Capacidad **HCM2000**, y una longitud $L = 4$ m, la separación es $s = 31,7$ m, independiente del intervalo y de la velocidad. Por debajo de una separación de 32 m es probable que el tráfico de esta corriente no sea estable, sea cual sea el intervalo entre los vehículos.

1.2 Circulación aleatoria

En la realidad ni las velocidades, ni las separaciones, ni las longitudes de los vehículos, ni los intervalos temporales entre ellos son constantes; sino que tienen una distribución alrededor de unos valores medios.

Si se puede cambiar de carril, aparecen unos menores valores del intervalo temporal t , porque los conductores:

- a) aceleran o frenan para aprovechar espacios libres en el carril adyacente; o
- b) salen del carril, creando súbitamente un nuevo intervalo, mayor que los dos anteriormente existentes; o
- c) se introducen en el carril,

creando un intervalo nuevo al dividir en dos al previamente existente.

Tampoco la separación s de los vehículos es constante, ya que depende de:

1. La posibilidad de adelantar. Si existe, los vehículos se aproximan al vehículo precedente (más lento) para adelantarlos, ya sea en una carretera convencional (si tiene una calzada única de dos carriles, ocupando el carril de sentido contrario durante un cierto período) o en **autopista**⁽⁴⁾ (cambiando de carril con una mayor facilidad), aprovechando un intervalo incluso relativamente pequeño en el carril situado a su izquierda.
2. La necesidad de cambiar de carril (en los tramos de trenzado o en la proximidad de conexiones con el tronco).
3. La comodidad del conductor (la atención y concentración que está dispuesto a dedicar a la conducción y, específicamente, al comportamiento del vehículo precedente).

Para los valores medios se sigue cumpliendo que

$$t = \frac{L}{V}$$

Para medir el valor medio de t es preciso observar el tránsito de los vehículos por una sección transversal fija; luego en la ecuación anterior la velocidad media es la que se llama **media temporal**.

Pero la sobradamente conocida ecuación fundamental para hallar la densidad en un tramo se refiere a la velocidad media espacial es:

$$I = V \cdot D$$

estando la relación entre las velocidades medias temporal y espacial dada por

$$\frac{V_t}{V_e} = \frac{L}{V_e \cdot t}$$

siendo σ_e la desviación-tipo de la distribución de las velocidades espaciales en el tramo.

El segundo sumando se puede estimar en el 10 % del **primero**⁵. Se puede argumentar que el 10% no

introduce una variación apreciable; pero puede ser significativa si se añade a otras variaciones al comparar datos teóricos con datos reales.

En el modelo estacionario del apartado anterior, la media temporal y la espacial coinciden.

2. Lo que ordena el Reglamento General de Circulación

Supóngase ahora que, en **cumplimiento**⁽⁶⁾ de lo dispuesto en el artículo 95.6 del Reglamento General de Circulación (**RGC**)⁽⁶⁾, ha de ser

$s > 100$ m⁽⁷⁾ y, para velocidades altas, $t > 4$ s⁽⁸⁾

Como se trata de vehículos ligeros, también supondremos $L = 4$ m. Para fijar las ideas, en lo que sigue se va a utilizar un modelo estacionario de intervalos, separaciones y velocidades constantes.

El cumplimiento simultáneo de ambas condiciones tiene lugar si

$$t = \frac{L}{V}$$

o sea, para $V = 93,6$ km/h, que es superior al límite de velocidad que se suele fijar para un túnel (80 km/h).

(2) El tiempo que transcurre entre el paso del morro de dos vehículos consecutivos por una sección.

(3) Siempre que estos parámetros sean constantes para todos los vehículos. Es cierto, pero se trataría de un t_{medio} , y en la realidad $t=f(v)$.

(4) También se puede acercar al vehículo precedente para presionarlo a fin de que abandone el carril y deje paso.

(5) Este 10% constituye una aproximación razonable, aunque May (1990) sugiere valores de entre el 1 y el 5%, y Coifman y otros (2003) proponen valores de entre el 10 y el 30% cuando existe congestión. Según los datos manejados por Rakha y Zhang, este coeficiente es aproximadamente igual al coeficiente de variación de la velocidad temporal.

(6) Aprobado por Real Decreto **1428/2003**, de 21 de noviembre (BOE nº 306, del 23 de diciembre).

(7) 150 m para los vehículos pesados (masa > 3,5 t),

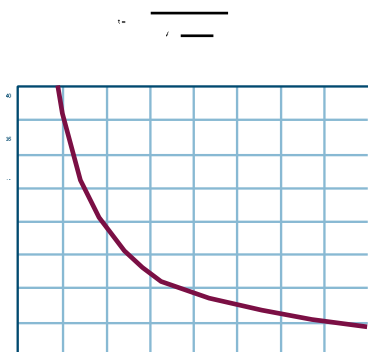
(8) 6 s para los vehículos pesados (masa > 3,5 t).

3ª conclusión: La condición $t > 4$ s sólo interviene para velocidades superiores al límite que se suele fijar en un túnel.

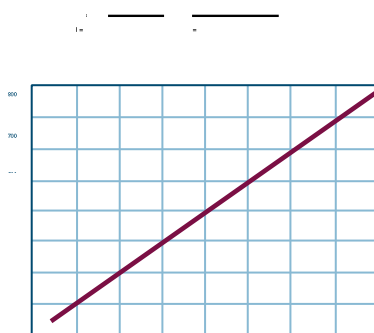
Una separación mínima de 100 m es notablemente superior a la que se puede observar en los túneles urbanos.

4ª conclusión: La condición $s > 100$ m no es observada por los conductores en los túneles urbanos.

Para $s = 100$ m, el intervalo entre vehículos estará dado por



La intensidad de la corriente de tráfico estará dada por



5ª conclusión: La observancia de este artículo del RGC condena a una intensidades que están muy por debajo de la capacidad (menos de la tercera parte).

La densidad de la corriente de tráfico será constante e igual a



también muy por debajo de la que marca la capacidad (28 veh./km⁽⁹⁾).

3. Lo que dice la Directiva europea 2004/56/CE

Supóngase ahora que, en cumplimiento de lo dispuesto en el artículo 3.9 del Anexo II a la Directiva 2004/56/CE del Parlamento Europeo y del Consejo⁽¹⁰⁾, ha de ser:

$$t > 2 \text{ s}^{(11)} \text{ y } s > 5 \text{ m}$$

Como se trata de vehículos ligeros, supondremos $L = 4$ m. Para fijar las ideas, en lo que sigue también se va a utilizar un modelo estacionario de intervalos, separaciones y velocidades constantes.

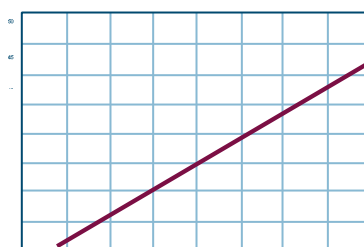
El cumplimiento simultáneo de ambas condiciones tiene lugar si

$$\frac{V}{3,6} = 2 = 1$$

o sea, para $V = 16,2$ km/h. Como reza el citado artículo 3.9, la separación $s = 5$ m sólo es aplicable cuando el tráfico se detiene.

Para $t = 2$ s, la separación entre los vehículos en función de su velocidad está dada por:

$$\frac{V}{3,6} = 2 = 4$$



Los valores dados por esta fórmula y representados en el gráfico se acercan más a los que se pueden observar en los túneles urbanos, aunque siguen siendo superiores a éstos.

6ª conclusión: La condición $t > 2$ s podría observada por los conductores en los túneles urbanos.

De hecho, en el túnel de salida de la M-30 hacia la A-3, puesto en servicio en Madrid en 2006:

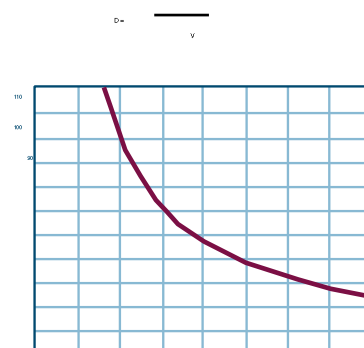
■ La velocidad media es de 74,3 km/h⁽¹²⁾.

■ El intervalo medio entre los vehículos es de 2,23 s⁽¹³⁾.

La intensidad de la circulación se-

rá constante: $I = 1800$ veh./h, bastante inferior a la capacidad.

La densidad de la corriente de tráfico en función de su velocidad está dada por



La densidad máxima compatible con la capacidad ($D = 28$ según el Manual de Capacidad HCM2000) se alcanza para $V = 64,3$ km/h. Este valor de la velocidad se corresponde con el comúnmente aceptado para las condiciones de circulación en capacidad.

7ª conclusión: Para una velocidad de 64 km/h, el túnel alcanza su capacidad. El intervalo $t = 2$ s parece razonable.

En el túnel de salida de la M-30 hacia la A-3, puesto en servicio en Madrid en 2006, la separación media entre los vehículos es de 45,8 m⁽¹⁴⁾.

Pero al abandonar el modelo estacionario y, por lo tanto, simplificado cabe hacerse una pregunta: ¿es razonable obligar⁽¹⁵⁾ a un t mínimo en una situación en la que se cambia de carril?

(9) Según el Manual de Capacidad HCM2000.

(10) Publicada, con corrección de errores, en el DOUE del 7 de junio de 2004

(11) Considerando un intervalo mínimo $t_{\min} = 0,5$ s, un $t_{\text{medio}} = 2,2$ s y una desviación típica de 1,2 s, una distribución Pearson tipo III muestra que casi el 47% de los intervalos serán menores de 2 s.

(12) Oscilaciones semanales entre 72,4 y 81,2 km/h.

(13) Oscilaciones semanales entre 2,18 y 2,39 km/h.

(14) Oscilaciones semanales entre 44,0 y 50,0 m.

(15) Esto es, multando a los infractores.

Supongamos una situación en la que los vehículos estuvieran circulando con un intervalo mínimo obligado en todos los carriles⁽¹⁶⁾. La existencia de ese intervalo mínimo implica que se producirían cambios de velocidad (frenazos, probablemente bruscos) cuando un vehículo se viera en la necesidad de crear un intervalo igual al mínimo con el vehículo precedente que acabase de cambiar de carril. Éste, a su vez, estaría frenando para hacer lo propio con el vehículo que le precede en el carril al que llega.

Por lo tanto, sería más razonable hablar de *buscar o tender* a un intervalo mínimo, en vez de obligar y sancionar.

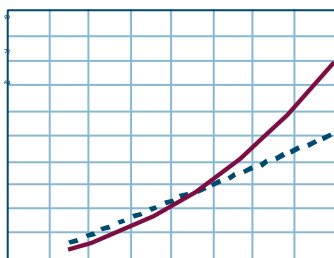
4. Lo que decía el Código de la Circulación

Supóngase ahora que, en cumplimiento de lo dispuesto en el hoy derogado artículo 99 del Código de la Circulación⁽¹⁷⁾, ha de ser

$$s = \left(\frac{V}{10} \right)^2$$

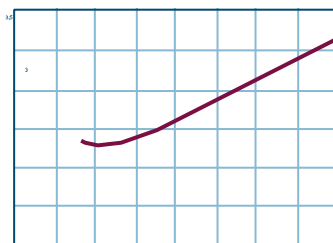
Como se trata de vehículos ligeros, también supondremos $L = 4$ m. Para fijar las ideas, en lo que sigue también se va a utilizar un modelo estacionario de intervalos, separaciones y velocidades constantes.

La separación $s = 5$ m se alcanzaría para $V = 22,4$ km/h: una velocidad por debajo de la cual se puede considerar que el tráfico se detiene con mucha frecuencia.



El intervalo resulta ahora variable:

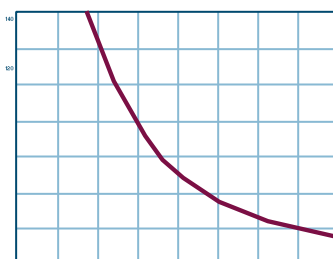
$$t = \frac{s}{V} = \frac{\left(\frac{V}{10} \right)^2}{V} = \frac{V}{100}$$



El intervalo proporcionado por este criterio de separación está comprendido entre un mínimo de casi 1,5 s (para la velocidad que corresponde a una separación de 5 m), y un máximo de unos 3 s. Unos valores razonables.

La densidad de la corriente de tráfico en función de su velocidad está dada por:

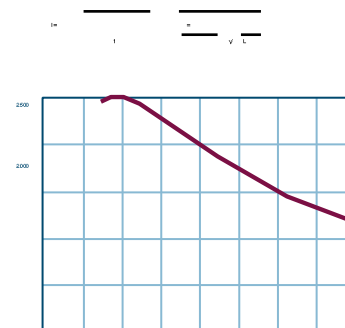
$$D = \frac{V}{s}$$



La densidad máxima compatible con la capacidad ($D = 28$ según el Manual de Capacidad **HCM2000**) se alcanzaría para $V = 56,3$ km/h, a la que corresponde un intervalo $t = 2,3$ s. Este valor de la velocidad se corresponde con el comúnmente aceptado para las condiciones de circulación en capacidad.

Por último, la intensidad de la circulación está dada por:

Parece imprescindible que se cambie el artículo 95.6 del Reglamento General de Circulación



La capacidad del carril, que según el **HCM2000** es igual a 2200 veh./h para una velocidad libre de 80 km/h, se alcanzaría para $V = 33,5$ km/h.

8ª conclusión: El criterio del Código de la Circulación era realmente bastante razonable.

5. Conclusión general

A la vista de lo expuesto, parece imprescindible que se cambie el artículo 95.6 del Reglamento General de Circulación, para el cual se sugiere la siguiente redacción:

6. En los túneles o pasos inferiores, el conductor deberá aplicar rigurosamente todas las normas de circulación relativas a ellos contenidas en este Reglamento y especialmente las referidas a la prohibición de parar, estacionar, cambiar el sentido de la marcha, marchar hacia atrás y adelantar. Además, deberá utilizar el alumbrado correspondiente.

Cuando no se pretenda adelantar, deberá mantenerse en todo momento una distancia de seguridad con el vehículo precedente de, al menos, 100 metros o un intervalo mínimo de cuatro segundos. En el caso de vehículos cuya masa máxima autorizada sea superior a 3500 kilogramos, la distancia de seguridad que deberá guardar con el vehículo precedente será de, al menos, 150 metros o un intervalo mínimo de seguridad de seis segundos.

En los túneles urbanos, las dis-

(16) Como se verá más adelante, esto es optimista para intensidades elevadas.

(17) Aprobado por Decreto del 25 de septiembre de 1934 (Gaceta del 26).

tancias mínimas de seguridad mencionadas en el párrafo anterior se podrán reducir al mayor de los valores siguientes: 5 metros, o el número (en metros) que resulte que resulte de elevar al cuadrado el de su velocidad, expresada en miriámetros por hora.

En los túneles o pasos inferiores con circulación en ambos sentidos, está prohibido el adelantamiento, salvo que exista más de un carril para su sentido de circulación, en los que se podrá adelantar sin invadir el sentido contrario.

Referencias

1. Chandra, S. y Kumar, R. (2001): "Headway modelling under mixed traffic on urban roads". *Road & Transport Research*, marzo 2001.
2. Coifman, B., Lyddy, D., y Skabardonis, A. (The Berkeley Highway Laboratory): "Building on the I-880



Field Experiment", *Proc. IEEE ITS Council Annual Meeting, IEEE*, 2000, pp. 5-10.

3. May, A.D (1990): *Traffic Flow Fundamentals*. Prentice Hall, 1990.

4. Ministerio del Interior: Reglamento General de Circulación, aprobado por Real Decreto **1428/2003**, de 21 de noviembre (BOE nº 306, del 23 de diciembre).

5. Rakha, H. y Zhang W. (2005)

"Estimating Traffic Stream Space-Mean Speed and Reliability from Dual and Single Loop Detectors". Artículo enviado al TRB.

6. Unión Europea: Directiva **2004/56/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de la red transeuropea de carreteras. Publicada (con corrección de errores) en el **DOUE** del 7 de junio de 2004. ■