

Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad Carlos III de Madrid



INGENIERÍA DEL TRÁFICO. PARÁMETROS FUNDAMENTALES

TRANSPORTES

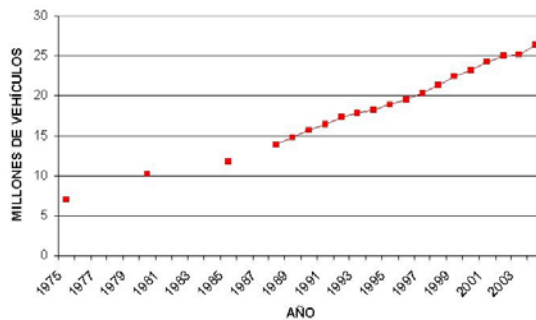
INGENIERÍA DEL TRÁFICO I. PARÁMETROS FUNDAMENTALES

INTRODUCCIÓN

Transporte: cambio de posición geográfica de personas o mercancías



Tráfico: transporte referido exclusivamente al movimiento de vehículos



Ingeniería del Tráfico

Evolución del tráfico en España

INTRODUCCIÓN

INGENIERÍA DEL TRÁFICO:

rama de la Ingeniería que tiene como principales objetivos el planeamiento, el trazado y la explotación de las redes viarias, de forma que la circulación de personas y mercancías sea:

- Segura.
- Rápida.
- Eficaz.

INTRODUCCIÓN

Dentro de los objetivos anteriores pueden separarse dos conceptos:

- Planeamiento de redes viarias para necesidades futuras.



- Ordenación y regulación del tráfico para resolver problemas actuales o previsibles a corto plazo.



INTRODUCCIÓN

El estudio del fenómeno del tráfico desde el punto de vista científico-técnico exige la definición de una serie de conceptos, variables y parámetros que permitan entenderlo y aproximarse a las soluciones que resuelven los problemas que genera.

Laboratorio



Carretera



CIRCULACIÓN

- **Circulación continua:**

No existen elementos de regulación fijos externos al flujo de tráfico, tales como semáforos, que obliguen a detenerse a los vehículos. Las detenciones que puedan presentarse se producen por causas internas de la propia corriente del tráfico (accidente, colisión, avería, etc.)

- **Circulación discontinua:**

Existen elementos fijos que producen interrupciones periódicas en la circulación vial (semáforos, stops, etc.). Estos equipos obligan a reducir la velocidad significativamente (incluso a parar) en un momento dado

INTENSIDAD

Número de vehículos que atraviesan una sección transversal determinada de una carretera por unidad de tiempo

$$I = \frac{n(x)}{t}$$

$n(x)$ ← n° de vehículos que atraviesan la sección fija (x)
 t ← Intervalo temporal estudiado



Unidades más utilizadas:

- Vehículos / hora (intensidad horaria).
- Vehículos / día (intensidad diaria).

INTENSIDAD



VOLUMEN DE TRÁFICO
 Número de vehículos que atraviesan una sección determinada de vía durante un tiempo determinado

INTENSIDAD HORARIA EQUIVALENTE
 $I = \frac{n(x)}{t}$ t < 1 hora expresado en horas

INTENSIDAD

Volumen de tráfico e intensidad horaria equivalente:

Periodo	Volumen (v)	Intensidad de Tráfico (v/h)
5:00 – 5:15	1000	4000
5:15 – 5:30	1200	4800
5:30 – 5:45	1100	4400
5:45 – 6:00	1000	4000

INTENSIDAD



INTENSIDAD HORARIA



INTENSIDAD HORARIA PUNTA
Intensidad horaria medida durante la hora representativa de las condiciones de mayor circulación

Se utiliza para: determinación de la capacidad de las vías, características de las intersecciones y enlaces, control de tráfico, coordinación de semáforos y ordenación de la circulación.

INTENSIDAD

t < 1 hora 1 hora 1 día 1 año t

INTENSIDAD DIARIA
 Número de vehículos que circulan por un determinado punto durante un día completo

INTENSIDAD DIARIA MÁXIMA
 Número de vehículos que circulan durante el día del año en que se produce el tráfico máximo

INTENSIDAD

t < 1 hora 1 hora 1 día 1 año t

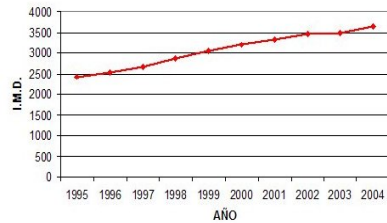
INTENSIDAD MEDIA DIARIA ANUAL (IMD)

Número total de vehículos que han pasado por una sección de la carretera durante un año determinado dividido por 365

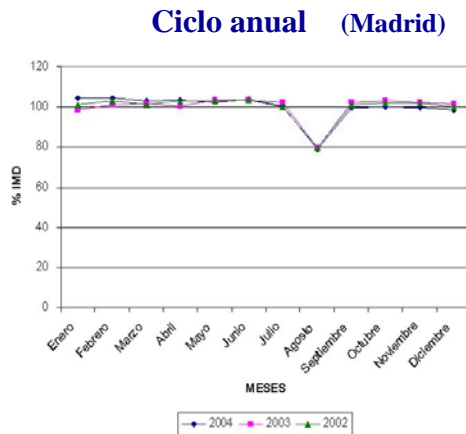


Se utiliza para: Clasificación vías, índices de accidentes, programas de mejora, tendencias en el uso de vías, estudios económicos...

CICLOS DE LA INTENSIDAD DE TRÁFICO



**Tendencia genérica
(Navarra)**



Ciclo anual (Madrid)

CICLOS DE LA INTENSIDAD DE TRÁFICO

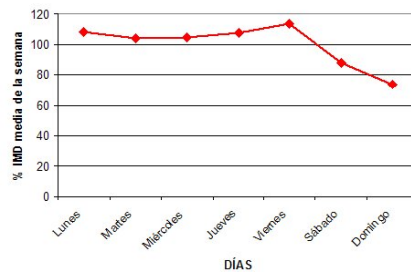
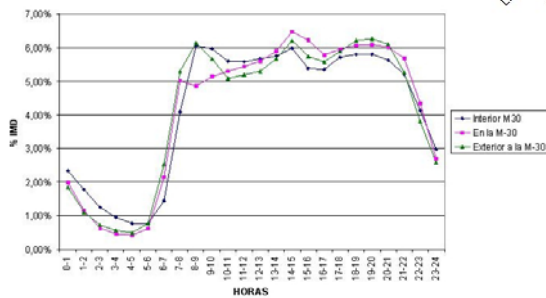
• Ciclo anual:

- Sensible a factores:
 - Carácter turístico de las zonas donde discurre el tráfico.
 - Bajas intensidades de tráfico (IMD < 500 vehículos).
 - Proximidad a una gran población.
- Factores que ayudan una distribución uniforme:
 - Carácter industrial de la zona.
 - Mayor proporción de tráfico pesado.
 - Situación próxima al centro de la ciudad.

CICLOS DE LA INTENSIDAD DE TRÁFICO

Distribución de frecuencias de intensidades horarias

(Madrid)



Ciclo semanal (Gernika)

FACTOR DE HORA PUNTA (FHP)

El factor de hora punta tiene en cuenta las variaciones del tráfico a corto plazo

$$FHP = \frac{Q}{4Q_{15MAX}}$$

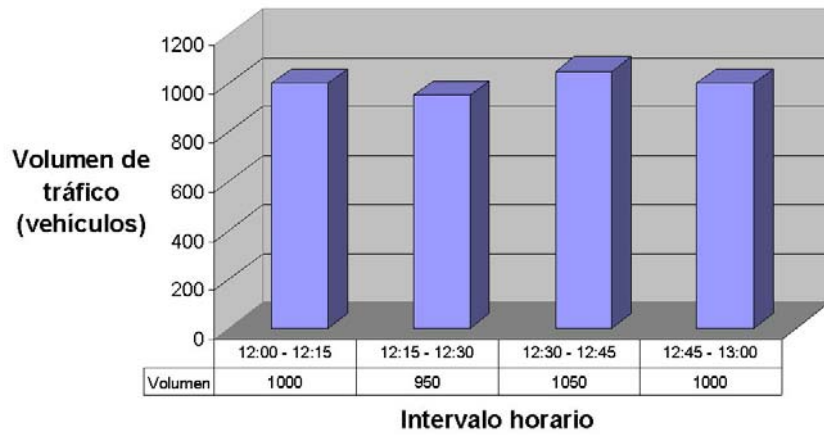
Volumen de tráfico durante la hora
 Volumen máximo registrado durante 15 minutos consecutivos de esa hora

En autopista:

$$FHP = \frac{Q}{12Q_{5MAX}}$$

Variaciones muy rápidas de tráfico

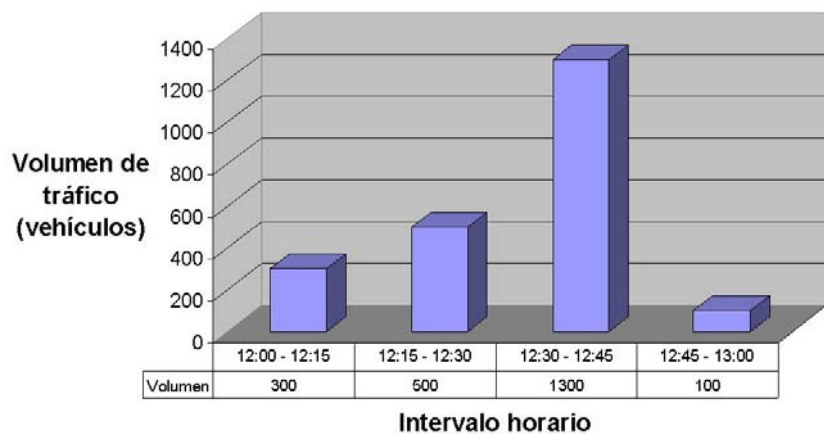
FACTOR DE HORA PUNTA (FHP)



$$FHP = \frac{4000}{4 \cdot 1050} \approx 0,95$$

➡ **Tráfico homogéneo**

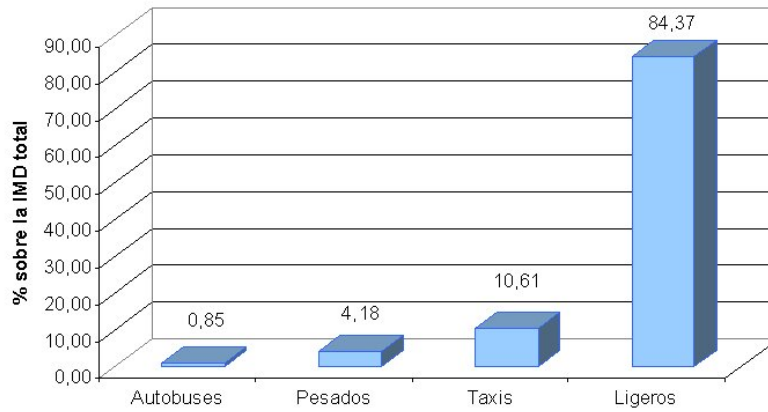
FACTOR DE HORA PUNTA (FHP)



$$FHP = \frac{2200}{4 \cdot 1300} \approx 0,42$$

➡ **Tráfico no homogéneo**

COMPOSICIÓN DEL TRÁFICO

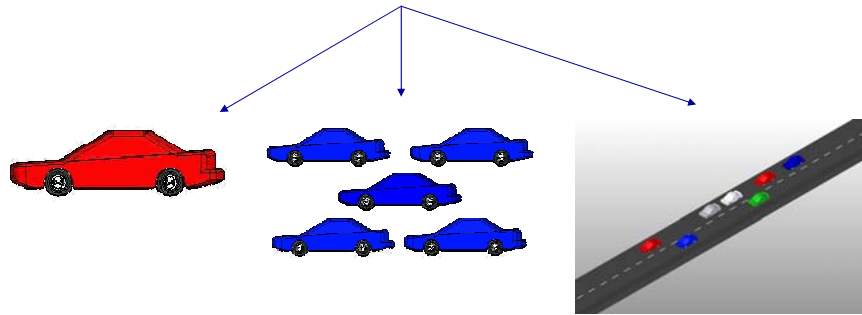


Peatones, vehículos no motorizados, motocicletas, vehículos ligeros, vehículos pesados, tractores y autobuses y autocares

VARIABLES FUNDAMENTALES DEL TRÁFICO

- **Intensidad**
 - Volumen de tráfico
 - Intensidad horaria equivalente
 - Intensidad horaria
 - Intensidad horaria punta
 - Intensidad diaria
 - Intensidad diaria máxima
 - Intensidad media diaria anual (IMD)
 - Ciclos de la intensidad
 - Factor de hora punta
 - Composición del tráfico

VELOCIDAD



V. local instantánea
V. de circulación
V. de recorrido

V. media instantánea
V. media en un tramo
V. media en movimiento

V. percentil 85
V. de proyecto
V. de servicio

VELOCIDAD DE UN VEHÍCULO

Velocidad local instantánea:

Velocidad de un vehículo al atravesar una determinada sección de una vía

Velocidad de circulación (V_c):

$$V_c = \frac{\text{distancia recorrida en un tramo}}{\text{tiempo movimiento para recorrerla}}$$

Velocidad de recorrido (V_r):

$$V_r = \frac{\text{distancia recorrida en un tramo}}{\text{tiempo total invertido en recorrerla}}$$

VELOCIDAD DE UN GRUPO DE VEHÍCULOS

Velocidad media instantánea:

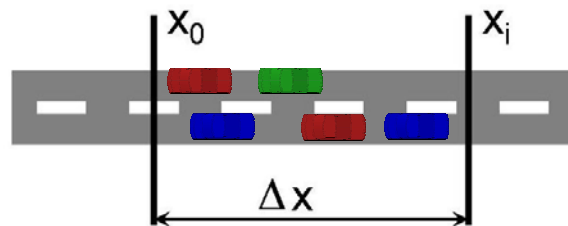
$$V_{t,e} = \frac{\sum V_j}{n}$$

Velocidad local (V_j)

X



Velocidad espacial (V_e)



VELOCIDAD DE UN GRUPO DE VEHÍCULOS

Velocidad media en un tramo (V_r):

$$V_r = \frac{\text{longitud de un tramo}}{\text{media de los tiempos invertidos en recorrerla}}$$

$$V_r = \frac{L}{\frac{\sum t_j}{n}} = \frac{nL}{\sum t_j}$$

Velocidad media en movimiento:

$$V_{m} = \frac{\text{longitud de un tramo}}{\text{media de los tiempos en movimiento para recorrerla}}$$

VELOCIDAD DE UN GRUPO DE VEHÍCULOS

Velocidad local instantánea (km/h)	Tiempo		Tiempo excepto paradas	
	Segundos	Horas	Segundos	Horas
36	5	0,00138889	5	0,00138889
60	45	0,0125	3	0,00083333
45	4	0,00111111	4	0,00111111
45	4	0,00111111	4	0,00111111
36	5	0,00138889	5	0,00138889
30	6	0,00166667	6	0,00166667
60	3	0,00083333	3	0,00083333
22,5	8	0,00222222	8	0,00222222
30	6	0,00166667	6	0,00166667
30	6	0,00166667	6	0,00166667

TRAMO DE VÍA: 50 m

Velocidad media instantánea:

$$V_t = \frac{\sum V_j}{n} = \frac{394,5}{10} = 39,45 \text{ km/h}$$

Velocidad media del tramo:

$$V_r = \frac{nL}{\sum t_j} = \frac{0,5}{0,02555} = 19,56 \text{ km/h}$$

Velocidad media de movimiento:

$$V_m = \frac{nL}{\sum t_j} = \frac{0,5}{0,01389} = 36 \text{ km/h}$$

$$V_{rm} \leq V_t$$

OTROS CONCEPTOS DE VELOCIDAD

Velocidad percentil 85:

Velocidad que sólo es sobrepasada por el 15 % de los vehículos, considerando sólo los de turismos que son los más rápidos

Esta velocidad suele ser alrededor de un 20 % superior a la media

Velocidad de proyecto:

Velocidad que se toma como base para definir los elementos geométricos de la vía: radios de curvas, peraltes...

Velocidad de servicio:

Velocidad a la que se puede circular por una determinada vía en situaciones atmosféricas favorables, en las condiciones de circulación existentes en cada momento y dentro de unos márgenes de seguridad razonables

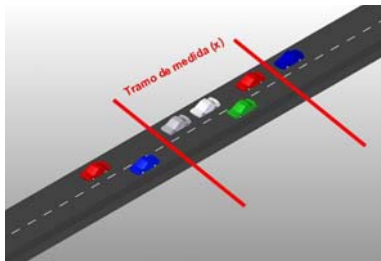
VARIABLES FUNDAMENTALES DEL TRÁFICO

• Velocidad

- **Velocidad de un vehículo**
 - Local o instantánea
 - De circulación
 - De recorrido
- **Velocidad de un grupo de vehículos**
 - Media instantánea (local o espacial)
 - Media en un tramo
 - Media en movimiento
- **Otros conceptos de velocidad**
 - Velocidad percentil 85
 - Velocidad de proyecto
 - Velocidad de servicio

DENSIDAD

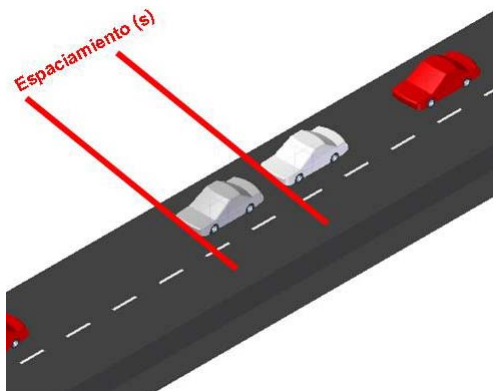
Número de vehículos que ocupan un tramo de carretera de longitud dada en un instante determinado



- Se suele medir en vehículos/km.
- Valor máximo \Rightarrow los vehículos están en fila sin huecos entre ellos.
- Depende de la longitud media de los vehículos.
- Refleja la libertad de maniobra dentro de la corriente de tráfico.

ESPACIAMIENTO O SEPARACIÓN

Distancia entre las partes frontales de un vehículo y el que le sucede por el mismo carril en un instante dado



Valor medio

$$s_m = \frac{1}{D}$$

ESPACIAMIENTO DE SEGURIDAD

Espaciamento que, por término medio, deberían guardar los vehículos para garantizar que la circulación se desarrolle en condiciones de seguridad

Hipótesis:

- Longitud media vehículo: 6 m
- Tiempo de percepción 2/3÷1 s

Velocidad media de los vehículos implicados (Km/h)

$$s_s = 6 + \left(\frac{V}{3,6} \right) \cdot t_{percepcion}$$

longitud
vehículos

tiempo desde que el vehículo de delante frena
hasta que el seguidor lo percibe (s)

Otras hipótesis:

$$s_s = a + b \cdot V + c \cdot V^2$$

longitud
vehículos

tiempo de reacción
conductores

distancia de
frenado

ESPACIAMIENTO DE SEGURIDAD

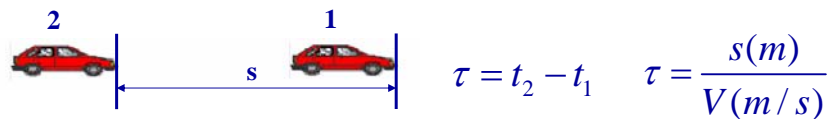
$$s_s = 6 + \left(\frac{V}{3,6}\right) \cdot t_{percepcion} \Rightarrow \begin{cases} t = 2/3s \Rightarrow s_s = 6 + 0,185V \\ t = 1s \Rightarrow s_s = 6 + 0,278V \end{cases}$$

$$s_s = a + b \cdot V + c \cdot V^2 \Rightarrow \begin{cases} s_s = 5,35 + 0,22V + 9,4 \cdot 10^{-4}V^2 & \text{Ec. R. Smeed} \\ s_s = 8 + 0,2V + 0,003V^2 \end{cases}$$

Velocidad (en km/h)	40	60	80	100	120
$s_s = 6 + 0,185V$	13,4m	17,1m	20,8m	24,5m	28,2m
$s_s = 6 + 0,278V$	17,12m	22,68m	28,24m	33,80m	39,36m
$s_s = 5,35 + 0,22V + 9,4 \cdot 10^{-4}V^2$	15,65m	21,93m	28,97m	38,75m	45,29m
$s_s = 8 + 0,2V + 0,003V^2$	20,8m	30,8m	43,2m	58m	75,2m

INTERVALO

Tiempo transcurrido entre el paso de dos vehículos sucesivos por una misma sección



El valor medio de los intervalos es la inversa de la intensidad de tráfico:

$$\tau_m = \frac{\sum \tau}{n} = \frac{1}{I} \quad \text{se mide en s/vehículo}$$

VARIABLES FUNDAMENTALES DEL TRÁFICO

•Intensidad

- Volumen de tráfico e intensidad horaria equivalente
- Intensidades horarias, diarias, IMD...
- Ciclos de la intensidad
- Factor de hora punta
- Composición del tráfico

•Velocidad

- De un vehículo
- De un grupo de vehículos
- Otras: percentil 85, de proyecto, de servicio

$$I = V \cdot D$$

•Densidad

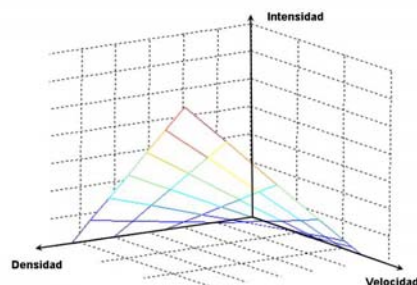
- Separación o espaciamiento
- Intervalo

ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE TRÁFICO

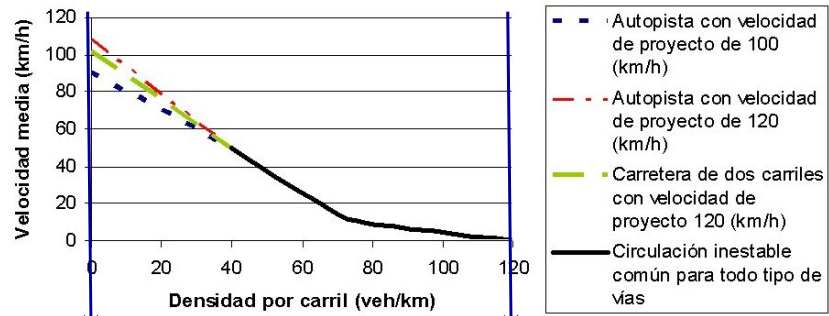
Primera aproximación:

$$\left. \begin{array}{l} \tau = \frac{s}{V} \\ s = \frac{1}{D} \\ \tau = \frac{1}{I} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{1}{I} = \frac{1}{D \cdot V} \Rightarrow I = D \cdot V$$

Tráfico homogéneo, velocidad media V, separación s

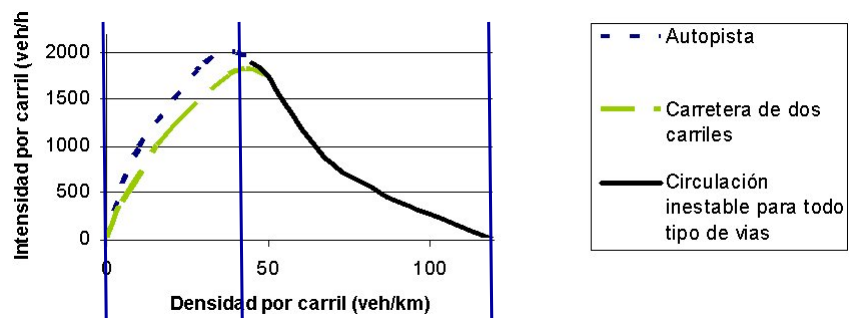


ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE TRÁFICO



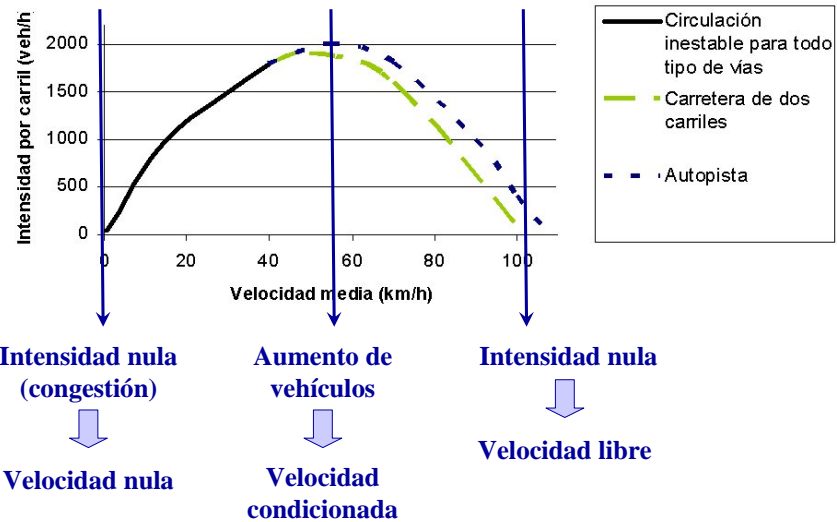
Pocos vehículos → **Velocidad libre**
Aumento de vehículos → **Velocidad condicionada**
Densidad máxima → **Congestión**

ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE TRÁFICO



Densidad nula → **Intensidad nula**
Densidad crítica → **Intensidad máxima**
Densidad máxima (congestión) → **Intensidad nula**

ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE TRÁFICO



CAPACIDAD DE UN CARRIL

Número máximo de vehículos que pueden pasar por un carril por unidad de tiempo

$$C = \frac{V}{s_s} \cdot 1000 \quad (\text{vehículos/hora})$$

V = velocidad en km/hora


s = separación media mínima en metros entre las partes frontales de dos vehículos sucesivos, para una determinada velocidad

$$s_s = 6 + \left(\frac{V}{3,6}\right) \cdot t_{\text{percepcion}} \quad s_s = a + b \cdot V + c \cdot V^2$$

NIVEL DE SERVICIO

Intensidad < Capacidad

Si la Intensidad es igual a la Capacidad:

- Velocidad media baja.
- Separación entre vehículos pequeña.  Colisión entre vehículos
- Frecuentes detenciones imprevistas.

Nivel de servicio

Medida cualitativa representativa del funcionamiento de una vía cuando soporta una determinada intensidad de tráfico, que tiene en cuenta un conjunto de factores (velocidad, libertad de maniobra, seguridad, comodidad, confort y coste) que concurren en ella

NIVEL DE SERVICIO

Se define en función de las condiciones siguientes:

- Velocidad y tiempo de recorrido, considerando no sólo la velocidad instantánea, sino también el tiempo necesario para recorrer un tramo.
- Interrupciones de tráfico, así como la magnitud y frecuencia de los cambios bruscos de velocidad necesarios para mantener la corriente de tráfico.
- Libertad de maniobra para mantener la velocidad deseada.
- Seguridad, incluyendo no sólo los índices de accidentes sino también el peligro potencial.
- Comodidad en la conducción.
- Economía.

Intensidad de servicio: máxima intensidad compatible con un determinado nivel de servicio

NIVEL DE SERVICIO

- **Nivel A**
 - Alto grado de libertad funcional.
- **Nivel B**
 - Circulación estable aunque condicionada para los vehículos más rápidos.
- **Nivel C**
 - Circulación estable aunque considerablemente condicionada.
- **Nivel D**
 - Circulación inestable.
- **Nivel E**
 - Intensidad cercana a capacidad, detenciones frecuentes.
- **Nivel F**
 - Vía congestionada. Indicativo de que la demanda sobrepasa la capacidad en algún tramo.

CAPACIDAD Y NIVEL DE SERVICIO EN AUTOPISTAS

Nivel de servicio deseable



Relación I/C

Nivel de servicio	Velocidad de servicio (km/h)	Nivel de servicio para autopistas I/C		
		Velocidad específica de la vía $\geq 110 \text{ km/h}$	Velocidad específica de la vía $= 100 \text{ km/h}$	Velocidad específica de la vía $= 80 \text{ km/h}$
A	≥ 100	$\leq 0,5 - \frac{0,3}{n^{\circ} \text{ carriles}}$	No es posible alcanzar este nivel de servicio para ningún I/C	No es posible alcanzar este nivel de servicio para ningún I/C
B	≥ 90	$\leq 0,75 - \frac{0,5}{n^{\circ} \text{ carriles}}$	$\leq 0,25$	No es posible alcanzar este nivel de servicio para ningún I/C
C	≥ 80	$\leq \left[0,9 - \frac{0,3}{n^{\circ} \text{ carriles}} \right] \cdot FHP$	$\leq 0,45 \cdot FHP$	No es posible alcanzar este nivel de servicio para ningún I/C
D	≥ 65	$\leq 0,9 \cdot FHP$	$\leq 0,8 \cdot FHP$	$\leq 0,45 \cdot FHP$
E	< 65	≥ 1	≥ 1	≥ 1

CAPACIDAD Y NIVEL DE SERVICIO EN AUTOPISTAS

Determinación de C e I_s

En condiciones ideales, entre 2200 y 2300 vehículos/hora con mas de 6 carriles

Circulación sólo de vehículos ligeros
Carriles de, al menos, 3,60m de ancho y arcenes libres en 1,80 m

Anchura de cada carril	Factor de corrección para autopistas de 2 carriles	Factor de corrección para autopistas de 3 ó 4 carriles
3,60 m	1,00	1,00
3,30 m	0,97	0,96
3,00 m	0,91	0,89
2,70 m	0,81	0,78

Factores de corrección según el ancho de carriles y según los obstáculos laterales (F_c, F_o)

CAPACIDAD Y NIVEL DE SERVICIO EN AUTOPISTAS

Determinación de C e I_s

	Terreno llano	Terreno ondulado	Terreno accidentado
Camiones (E _c)	2	4	8
Autocares (E _a)	1,6	3	5

Factores de equivalencia según la composición del tráfico

Intensidad de servicio Número de carriles Factores de corrección

$$I_s = C_{CI} \cdot n \cdot \left(\frac{I}{C}\right)_s \cdot F_c \cdot F_o \cdot \frac{100}{100 - P_C - P_A + E_C P_C + E_A P_A}$$

Capacidad en condiciones ideales

I/C para el nivel de servicio

Porcentajes de camiones y autobuses

Factores de equivalencia

CAPACIDAD PARA CIRCULACIÓN DISCONTÍNUA

Problema complejo ya que intervienen intervienen muchos más factores.

Nivel servicio	Definición circulación/demora	Velocidad (km/h)	Índice de congestión	Factor de hora punta	I/C
A	Fluida	> 45	0	0,7	0,6
B	Estable/ligera	> 40	0,1	0,8	0,7
C	Estable/aceptable	> 35	0,3	0,85	0,8
D	Pre-inestable/tolerable	> 25	0,7	0,9	0,9
E	Inestable, congestionada/intolerable	25	0,85 - 1	0,95	1
F	Forzada, congestión total	< 25	despreciable	despreciable	despreciable

CAPACIDAD PARA CIRCULACIÓN DISCONTÍNUA

Para realizar una estimación de la capacidad en condiciones de circulación discontinua, es necesario estudiar con más detalle la capacidad de las intersecciones



FACTORES QUE INFLUYEN

Condiciones físicas y de operación
Condiciones ambientales
Características del tráfico
Medidas de control de tráfico

CAPACIDAD PARA CIRCULACIÓN DISCONTÍNUA

• Condiciones físicas y de operación

- **Ancho del acceso:** La anchura del acceso a una intersección no varía solamente con la de la calle, sino también por la disposición de las marcas viales, las isletas de canalización y la existencia de otros obstáculos.
- **Circulación en sentido único o doble:** Una vía urbana que opera en dos sentidos tendrá una capacidad ligeramente menor que si lo hace en sentido único, debido a la interactuación entre ambos sentidos.
- **Estacionamiento lateral:** La supresión del estacionamiento siempre proporciona un aumento de la capacidad, puesto que se evitan maniobras que ocupan zonas destinadas a la circulación.
- **Pendiente de la vía:** Si la pendiente de la vía es ascendente, la velocidad de los vehículos será menor y la capacidad se reducirá.

CAPACIDAD PARA CIRCULACIÓN DISCONTÍNUA

• Condiciones ambientales

- **Factor de carga:** Es un factor que evalúa el grado de aprovechamiento del tiempo que permanece en verde un semáforo.
- **Factor de hora punta:** Refleja las variaciones de la intensidad de tráfico.
- **Población del área urbana:** Entre dos intersecciones de idéntico trazado y regulación tiene más capacidad aquella que está situada en una ciudad más grande. Sin embargo el factor de población es difícil de valorar, sobre todo teniendo en cuenta que la población influye también en otros factores como el de hora punta.
- **Ubicación dentro del área urbana:** Al igual que para distintas poblaciones e idéntico trazado la capacidad varía, para distintas ubicaciones de la misma intersección dentro de la misma ciudad pueden observarse distintas capacidades. Generalmente, se distinguen tres zonas dentro del área urbana: el centro, la periferia del centro y las zonas intermedias entre las anteriores.

CAPACIDAD PARA CIRCULACIÓN DISCONTÍNUA

• Características del tráfico

- **Giros a la derecha y a la izquierda:** Estas maniobras provocan obstrucción parcial del tráfico directo y su influencia en la capacidad puede llegar a ser muy importante si son muchas.
- **Presencia de autobuses y vehículos pesados:** Por ser estos vehículos más lentos, no sólo en velocidad sino también en la realización de maniobras, su presencia tiende a disminuir la capacidad.
- **Autobuses de transporte urbano:** Además de lo anterior, los autobuses de transporte urbano realizan mayor número de maniobras de parada y continuación de la marcha para la subida y bajada de viajeros. Su efecto va a depender de la zona de la ciudad, del número de paradas, del tiempo de parada y del lugar de ésta.

• Medidas de control de tráfico

- **Semáforos:** Su importancia en la capacidad se manifiesta en la duración y el reparto del tiempo del ciclo semafórico.
- **Señalización vertical y marcas viales:** Tienden a organizar el flujo del tráfico y mejoran la capacidad.

CAPACIDAD PARA CIRCULACIÓN DISCONTÍNUA

Ejemplo: Método australiano o de Ackelik

Capacidad total de la vía → $C_r = \sum_{i=1}^n C_{ci}$ ← Número de carriles
 ← Capacidad del i-ésimo carril

Capacidad del carril → $C_c = \frac{C_t \cdot f_w \cdot f_p}{f_c}$ ← Capacidad teórica del carril
 ← Factores de corrección

CAPACIDAD PARA CIRCULACIÓN DISCONTÍNUA

Ejemplo: Método australiano o de Ackelik

Capacidad teórica del carril

Zona \ Tipo de carril	1	2	3
A (periferia)	1850	1810	1700
B (intermedia)	1700	1670	1570
C (centro)	1580	1550	1270

1. Carril recto
2. Carril con posibilidad de giro. Su radio de curvatura debe ser superior a 15 metros. No existe posibilidad de cruce de peatones.
3. Carril con posibilidad de giro. Su radio de curvatura es inferior o igual a 15 metros o bien existe posibilidad de cruce de peatones.

CAPACIDAD PARA CIRCULACIÓN DISCONTÍNUA

Ejemplo: Método australiano o de Ackelik

Factor de corrección por anchura del carril

Anchura del carril, w (m)	f_w
$w \leq 3$	$0,55 + 0,14w$
$3 \leq w \leq 3,7$	1
$w > 3,7$	$0,83 + 0,05w$

Factor de corrección por composición del tráfico

$$f_c = \frac{\sum_{i=1}^n e_i I_i}{\sum_{i=1}^n I_i}$$

Factor de equivalencia tabulado según el tipo de giro del carril

Intensidad de cada tipo de vehículo

Factor de corrección por pendiente de la vía (p)

$$f_p = 1 + \left(\frac{0,5p}{100} \right)$$

pendiente (%)