

## TEMA 67

**PARÁMETROS FUNDAMENTALES DEL TRÁFICO. CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO DEL TRÁFICO, VARIACIÓN, DISTRIBUCIÓN Y COMPOSICIÓN. INTENSIDAD DE TRÁFICO. DEFINICIÓN. DENSIDAD DE TRÁFICO. TIEMPOS DE RECORRIDOS Y DEMORAS. RELACIONES ENTRE LA INTENSIDAD, LA VELOCIDAD Y LA DENSIDAD**

### 1. INTRODUCCIÓN

### 2. PARÁMETROS FUNDAMENTALES DEL TRÁFICO I. CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO DE TRÁFICO, VARIACIÓN, DISTRIBUCIÓN Y COMPOSICIÓN.

#### 2.1. Intensidad

- a) Concepto
- b) Variación de la intensidad
- c) Distribución
- d) Composición del tráfico

### 3. INTENSIDAD DE TRÁFICO

### 4. DENSIDAD DE TRÁFICO

### 5. TIEMPOS DE RECORRIDO Y DEMORAS

- 5.1. Definición de tiempos de recorrido.
- 5.2. Velocidades medias en tiempo y espacio.
- 5.3. Definición de demora.
- 5.4. Medidas de tiempo de recorrido y demora.

### 6. RELACIONES ENTRE LA INTENSIDAD, VELOCIDAD Y DENSIDAD

- 6.1. Relación básica entre las tres magnitudes.
- 6.2. Relación entre velocidad y densidad.
- 6.3. Relación entre intensidad y densidad.
- 6.4. Relación entre velocidad e intensidad.

## 1.- INTRODUCCIÓN.

La ingeniería de tráfico tiene como principales objetivos la planificación, el proyecto y la explotación de redes viarias desde el punto de vista del fenómeno que acontece a lo largo de éstas como es el tráfico de vehículos. El objeto de la ingeniería de tráfico por tanto es la eficiencia de este fenómeno, minimizando los costes externos asociados al tráfico como son la accidentalidad, la congestión y los impactos ambientales adversos. circulación de personas y mercancías sea segura, rápida y económica. Los pilares básicos para el estudio del comportamiento del tráfico son los Parámetros Fundamentales: Intensidad, Velocidad y Densidad. Un tercer pilar y no menos importante es la relación existente entre estos, concidas como las Relaciones Fundamentales del Tráfico.

En el presente tema se estudia el tráfico desde el punto de vista de **circulación CONTÍNUA**, que es la característica de las vías interurbanas en su práctica totalidad con excepciones como travesías o vías convencionales con intersecciones a nivel reguladas. Entendemos por circulación continua, al tipo de circulación en el que no existen elementos de regulación fijos externos al flujo de tráfico, tales como semáforos o señalización, que obliguen a detenerse a los vehículos. Las detenciones que puedan presentarse se producen por causas internas de la propia corriente del tráfico, como cuando se produce un accidente, avería o incidente, no se considerarán para definir como circulación discontinua un flujo de tráfico.

Por su parte, se define la **circulación discontinua**, cuando existen unos elementos fijos que producen interrupciones periódicas en la circulación vial. Los semáforos, señales de STOP, y otros tipos de regulación son algunos de estos elementos. Estos equipos obligan a parar (o al menos a reducir la velocidad significativamente) a la circulación en un momento dado.

## **2.- PARÁMETROS FUNDAMENTALES DEL TRÁFICO. CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO DE TRÁFICO, VARIACIÓN, DISTRIBUCIÓN Y COMPOSICIÓN.**

### 2.1. INTENSIDAD

#### A) Concepto

Antes de analizar con detalle el parámetro de la intensidad, que se utiliza mayormente para expresar intensidades horarias y diarias, conviene citar su definición:

“Número de vehículos que pasa a través de una sección fija de carretera por unidad de tiempo”

Al concepto de intensidad, va asociado el de Volumen, que se define como sigue:

“Número total real de vehículos que pasan por una sección fija de carretera durante un intervalo de tiempo conocido”

La definición puede parecer confusa, y bien merece una aclaración. Si se considera un periodo de 10 minutos y se afora el número de vehículos que atraviesan la sección de carretera seleccionada, resultando un total de 250 vehículos, se dirá que el volumen de vehículos medido es de 250, mientras que la intensidad horaria - que resulta un indicador de referencia para conocer el estado de tráfico y asociarlo a la capacidad (que se define en base horaria) para conocer el rendimiento de la carretera a través de la relación intensidad/capacidad – sería

$$I = V / (10 \text{ min} / 1 \text{ hora}) = V / (10 \text{ min} / 60 \text{ min}) = V * 60 / 10 = 6V$$

Como cualquier parámetro, la intensidad de tráfico está sujeta a VARIACIÓN a lo largo del tiempo. Como se ha citado previamente, la manera clásica de representar la intensidad es es bien en base horaria (Ih) o en base diaria (IMD). Cuando se estudian las IMD y su evolución a lo largo del tiempo, ya sea semanas, meses o a años se pueden obtener oscilaciones cíclicas con frecuencias distintas. El fenómeno del tráfico responde a la búsqueda de satisfacción de una necesidad humana como es la movilidad de personas y el transporte de mercancías. De este modo, la demanda se ve condicionada por múltiples variables dependientes como son la economía, la tasa de paro, el precio del combustible, la tasa de motorización, las políticas de transporte, las costumbres sociales, la climatología, los periodos vacacionales, los horarios de las jornadas laborales, los horarios de comida, los horarios comerciales, etc. La variación de la intensidad en valor absoluto dependerá fundamentalmente del grado de variación de las variables dependientes a lo largo del tiempo y de la elasticidad de la demanda a estas variaciones. En cuanto a la variación del signo, (aumento o disminución de la demanda), dependerá también del cambio de signo de la evolución de las variables dependientes (aumento del paro, descenso del precio de combustibles, aumento de coste de peajes, etc), y afectará a la demanda en función de elasticidades conocidas.

De esta manera, la variación de la intensidad podría representarse como sigue:

$$\Delta I =$$

$$\sum \pm E_i \cdot$$

$$\Delta D_i + C$$

Donde:

I: Intensidad E: Coeficiente que representa la elasticidad de la Intensidad respecto a la variable dependiente Di. Di: Cada una de las variables dependientes que afectan al valor de la Intensidad.

Algunos ejemplos de variaciones de la demanda (intensidad) en función del ciclo temporal

analizado pueden ser los siguientes:

### **Ciclo anual**

Normalmente en cualquier tramo de calle o carretera la variación de la intensidad de tráfico del día típico de un mes sigue una ley relativamente constante a lo largo de los años, mientras no se modifiquen substancialmente las características físicas y funcionales de la vía o el uso del suelo próximo a ella. La variación generalmente es más acusada en las zonas rurales que en las urbanas y es sensible a una serie de factores que más adelante se detallan.

Así, por ejemplo, el aumento de intensidad durante el verano es mucho mayor en carreteras de zonas turísticas (costas, montaña, etc.) y menor en zonas industriales.

Entre los factores que contribuyen a que las variaciones de tráfico sean acusadas destacan los siguientes:

- El carácter turístico del tráfico.
- Las bajas intensidades de tráfico que hacen que los valores de las intensidades diarias sean más sensibles a situaciones extraordinarias.
- La proximidad a una gran población, que suele generar viajes de recreo de corto recorrido.

Por otra parte ayudan a una distribución uniforme a lo largo del año los factores siguientes:

- El carácter industrial de la zona.
- La mayor proporción de tráfico pesado.
- La situación próxima al centro de una ciudad, donde normalmente el tráfico de un día laborable cualquiera no difiere en más del 10 por 100 de la IMD.

### **Ciclo mensual:**

Se analiza utilizando la IMD, pudiendo representar un ejemplo la tendencia negativa de la intensidad a lo largo del mes desde su inicio hasta su fin debido a la capacidad adquisitiva y de repostaje de muchas familias, que a finales de mes optan por otros modos de transporte más competitivos al vehículo privado. Otro ejemplo podría ser la variación que con carácter mensual se repite cada mes de diciembre con la presencia de las vacaciones de navidad, con un aumento de la intensidad media diaria respecto a meses anteriores durante las tres primeras semanas y finalmente una reducción de la IMD en áreas periurbanas (movilidad obligada por motivo de trabajo/estudios), con un incremento en áreas interurbanas (movilidad no obligada de largo recorrido).

### **Ciclo semanal**

Normalmente el tráfico de los días laborables (de lunes a viernes), difiere del de los sábados y domingos. Las diferencias son más o menos acusadas según el tipo y la función de cada vía.

Esta variación semanal se acusa tanto en las vías urbanas como en las interurbanas: en las primeras, el domingo suele ser el día de menor tráfico. En las interurbanas la influencia relativa del tráfico en sábados y domingos varía a lo largo del año, siendo frecuente que en época de buen tiempo el domingo represente una punta acusada por la tarde. Las cifras de intensidades de tráfico en los días festivos son mucho más variables que las que corresponden a días laborables.

### **Ciclo diario**

Es quizás el más importante desde el punto de vista técnico. Los valores de la intensidad horaria del tráfico varían considerablemente a lo largo del día.

Puede decirse que durante la noche las intensidades son muy bajas, presentándose un valor mínimo generalmente entre las 3 y las 5 de la mañana. La intensidad horaria crece después muy rápidamente a primeras horas de la mañana. A partir de ese momento la evolución depende del tipo de vía y de su emplazamiento.

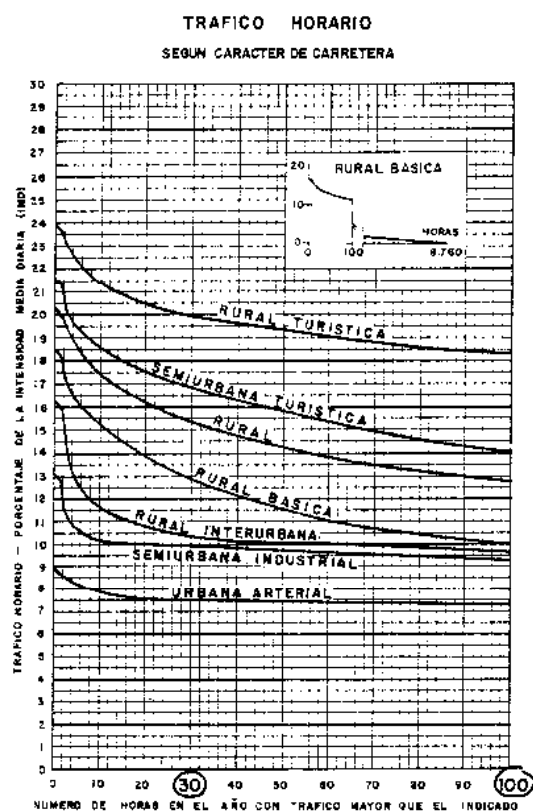
En los accesos a las grandes ciudades se presenta a las 8 ó 9 de la mañana una intensidad punta muy marcada, que luego disminuye rápidamente hasta un valor medio que se mantiene relativamente constante hasta alcanzar otro periodo de máximas intensidades a última hora, a partir del cual, descienden considerablemente las intensidades registradas.

Estas curvas horarias están sujetas a variaciones dependientes de: la estación del año, la ubicación geográfica de la vía, la tipología de carretera, la funcionalidad dentro de la red y las incidencias (meteorológicas, operaciones especiales, etc...)

### **C) Distribución**

- *Distribución de frecuencias de intensidades horarias.* Para realizar el proyecto de una vía ha de tenerse en cuenta la intensidad de tráfico que habrá de soportar. Pero la intensidad varía a lo largo del tiempo, por lo que habrá que atender a la frecuencia con que se presentan los distintos valores de esta intensidad, puesto que no estaría justificado utilizar como intensidad horaria representativa la intensidad máxima. Será preferible escoger un valor de la intensidad horaria que sólo sea sobrepasado durante un escaso número de horas al año. La práctica habitual es escoger como representativa de la demanda la intensidad horaria que sólo se excede durante 100 o 150 horas al año en función de los requerimientos del análisis que se vaya a abordar, considerándose así la, IH100 o la IH150.

La Orden FOM/273/2016, de 19 de febrero, por la que se aprueba la Norma 3.1-IC Trazado, de la Instrucción de Carreteras, expresa que en el diseño de carreteras en cada caso deberá justificarse la hora de proyecto adoptada, que no será inferior a la hora treinta (30) ni superior a la hora ciento cincuenta (150).



- *Distribución del tráfico entre diferentes carriles.* En las carreteras de dos carriles y dos sentidos de circulación se suele considerar la intensidad de tráfico total, es decir, la suma de las correspondientes a ambos sentidos. Mientras se consideren intensidades diarias, especialmente la IMD, será aceptable suponer que esta cifra se divide en partes iguales entre ambos sentidos. Por el contrario, cuando se consideran intensidades horarias pueden presentarse grandes diferencias entre sentidos.

En carreteras con calzadas separadas, suele ser normal considerar independientemente la intensidad correspondiente a cada calzada. Dentro de ellas, el tráfico se reparte entre los carriles existentes. Este reparto depende de la intensidad de tráfico total y de la composición del mismo. Por ejemplo, si las calzadas tienen dos carriles para un sólo sentido, cuando la intensidad de tráfico es baja la mayor parte de los vehículos utilizan el carril derecho, mientras que si la intensidad es muy alta se utiliza más frecuentemente el

carril izquierdo. Además la composición del tráfico es muy distinta en estos carriles, ya que en el carril derecho circulan muchos más vehículos lentos que por el izquierdo. Cuando la intensidad de tráfico aumenta, el carril derecho acaba siendo utilizado principalmente por vehículos pesados y vehículos ligeros lentos, mientras que el carril izquierdo lo utilizan preferentemente vehículos ligeros rápidos. Esta distribución de los vehículos, especialmente las condiciones que afectan al carril derechos, resultan importantes en ciertas situaciones, como en los enlaces.

#### D) Composición del tráfico.

Además de conocer el número total de vehículos que pasan por una carretera, frecuentemente interesará saber qué tipo de vehículos circulan por ella. Por esta razón al realizar los aforos se clasifican los vehículos registrados en varias categorías, más o menos detalladas según las necesidades. A menudo, se clasifican los vehículos según una clasificación resumida como la siguiente:

- Motocicletas
- Vehículos ligeros
- Vehículos pesados

La composición del tráfico se define mediante el porcentaje de vehículos en la IMD que pertenecen a cada categoría.

En general, la mayor parte del tráfico está formado por vehículos ligeros, mientras que las motos representan un porcentaje muy pequeño. Dentro de los vehículos ligeros, los más importantes son los coches (que forman del 85% al 90% del grupo de vehículos ligeros) y dentro de los vehículos pesados los camiones representan más del 90% de este grupo.

Naturalmente la composición del tráfico varía de unas carreteras a otras. Así, por ejemplo, en zonas urbanas, el porcentaje de vehículos ligeros es mayor que en carreteras, llegando en las calles céntricas de las grandes ciudades a ser superior al 90%. En las proximidades a las grandes ciudades, son frecuentes porcentajes de vehículos pesados entre el 15% y el 20%, mientras que en las zonas interurbanas, especialmente en itinerarios importantes para el transporte, son frecuentes porcentajes entre el 20% y el 30% e incluso superiores. Evidentemente, estas composiciones están sujetas a variaciones temporales.

### **3.- INTENSIDAD DE TRÁFICO. DEFINICIONES.**

Así pues, se define como intensidad de tráfico al número de vehículos que pasan a través de una sección fija de la carretera por unidad de tiempo. Las unidades más usadas son las de vehículos/hora (intensidad horaria) y vehículos/día (intensidad diaria).

Conviene, por otra parte, distinguir entre “volumen” e “intensidad”. El volumen es el número real de vehículos que pasan por una sección durante un intervalo. La intensidad de tráfico se obtiene dividiendo el número de vehículos observados durante un período

subhorario entre el tiempo de observación (en horas). En consecuencia, un volumen de 100 vehículos observado durante un período de 15 minutos (15-min) implica una *intensidad de tráfico* de 100/0,25 h, es decir 400 v/h.

Desde el punto de vista de la Ingeniería de Tráfico interesan especialmente dos estados de la variable intensidad en función del tiempo:

- La **intensidad media diaria anual**: número de vehículos que pasan por una sección durante un año, dividido por 365. Se conoce normalmente en España como IMD, y puede considerarse como la intensidad de tráfico que corresponde al día medio del año.
- La **intensidad horaria punta**: número de vehículos que pasan por una sección durante la hora que se considera representativa de las condiciones de mayor circulación.

La **IMD** se utiliza fundamentalmente para el **planeamiento**: clasificación de vías, programas de mejora, determinación de tendencias en el uso de las vías, determinación de características geométricas de carácter general, proyectos de señalización e iluminación...

La **intensidad horaria** se utiliza para el **proyecto y la ordenación**: capacidad de las vías, características de las intersecciones y enlaces, control de tráfico, coordinación de semáforos y ordenación de la circulación.

Por lo que respecta al concepto de intensidad de hora punta, ha de partirse de que el correcto funcionamiento de una vía no se juzga por su capacidad para intensidades medias, sino para intensidades en horas punta. Por ello la intensidad de tráfico en la hora punta—matizada a veces por la variación del tráfico dentro de esa hora— es de gran interés.

### **Factor de hora punta**

En el análisis de la capacidad de la sección la consideración de las intensidades punta tiene una importancia crucial.

Las intensidades de tráfico o de circulación punta se relacionan con los volúmenes horarios por medio del factor de hora punta, definido como la relación entre el volumen total horario y la intensidad de circulación máxima producida en un período de 15-min dentro de la hora:

$$\text{FHP} = \frac{\text{Volumen horario}}{\text{Intensidad de circulación punta (dentro de la hora)}}$$

Luego, si se utilizan períodos de 15-min, el FHP se calculará así:

$$\text{FHP} = Q/(4 \times Q_{15})$$

siendo:



FHP = el factor de hora punta

Q = el volumen horario, en v/h; y

Q<sub>15</sub> = el volumen durante los 15-min punta de la hora, en v/15 min.

#### **4.- DENSIDAD DE TRÁFICO.**

Se denomina densidad de tráfico al número de vehículos que hay en un tramo de carretera por unidad de longitud para un instante dado.

Evidentemente existe un valor máximo de la densidad de tráfico, que se obtiene cuando todos los vehículos están en fila, sin huecos entre ellos y que depende, lógicamente, de la longitud de los vehículos. En estas condiciones los vehículos estarán parados. Esta densidad máxima será igual al producto de la inversa de la longitud media de los vehículos por el número de carriles.

Es difícil medir directamente la densidad en el campo, pues es necesario contar con un punto elevado desde el que se pueda obtener imágenes de tramos de vía de longitud significativa. Se puede calcular, sin embargo a través de la velocidad media de recorrido y de la intensidad de circulación, que son de más sencilla medición. A partir de de la fórmula:

$$I = V \times D$$

en donde:

I = intensidad de circulación, en veh/h

V = velocidad media de recorrido, en km/h; y

D = densidad, en vh/km.

La densidad de tráfico influye de forma directa en la calidad de la circulación, ya que al aumentar la densidad resulta más difícil mantener la velocidad que el conductor desea y éste se ve obligado a realizar un mayor número de maniobras, generando una conducción más incómoda. Si la densidad se acerca a su valor máximo, se circula muy lentamente con frecuentes paradas y arranques.

Se ha comprobado que la libertad de maniobra y la separación de otros vehículos son aspectos altamente valorados por los conductores en relación con la calidad de servicio de circulación. Consecuentemente la densidad es una variable que explica la valoración que hacen los conductores de la calidad de la circulación, y de ahí el interés de utilizar esta variable.

#### **5. TIEMPOS DE RECORRIDO Y DEMORAS**

### 5.1. DEFINICIÓN DE TIEMPOS DE RECORRIDO.

En los accesos a las ciudades y en zonas urbanas la velocidad de los vehículos es muy variable, llegando a detenerse e incluso permanecer inmóvil. El trabajar con las velocidades instantáneas o locales no suele ser útil, por lo cual es preferible trabajar con tiempos de recorrido. Se entiende por **tiempo de recorrido**, el tiempo empleado por un vehículo en desplazarse entre dos puntos fijos separados una cierta longitud. La **velocidad de recorrido** será la relación entre la longitud del viaje y el tiempo de recorrido.

La tecnología actual mediante lectores de matrículas situados en secciones de las carreteras separadas varios kilómetros ayudados por cronómetros de elevadísima precisión permite medir la velocidad de cada vehículo en el tramo considerado lo que puede ser utilizado para sancionar a los vehículos que sobrepasen la velocidad permitida y calcular el tiempo de recorrido de los vehículos en dicho tramo.

### 5.2. VELOCIDADES MEDIAS EN TIEMPO Y ESPACIO.

Cuando se miden los tiempos empleados por cada vehículo en recorrer una cierta longitud, hallando luego la media de las velocidades individuales, se obtienen **velocidades medias en el tiempo** (velocidad media local). Si por el contrario, se obtiene primero la media de los tiempos empleados por cada vehículo y la velocidad se halla dividiendo la longitud recorrida por este tiempo medio, se obtiene la **velocidad media en el espacio**.

La primera es realmente un valor medio de velocidades: la segunda, un valor medio de tiempos de recorrido.

Es interesante tener esto en cuenta en los estudios de tráfico, para seguir siempre uno de los dos procedimientos, aunque cualquiera de ellos puede utilizarse, siempre que se mantenga a lo largo de un mismo estudio.

La ventaja de operar con tiempos, es que los tiempos pueden sumarse directamente y las velocidades no, lo que hace que en estudios urbanos sea generalmente más cómodo trabajar con tiempos que con velocidades. En cambio, las medias obtenidas con velocidades son más estables que los tiempos, y como consecuencia de ello, para un mismo grado de fiabilidad basta una muestra más reducida.

### 5.3. DEFINICIÓN DE DEMORA.

Cuando se mide el tiempo de recorrido conviene distinguir el tiempo de vehículo en movimiento y el tiempo de vehículo parado. **La demora** es una medida crítica de las prestaciones existentes en vías con circulación discontinua y en accesos a grandes ciudades. La palabra demora puede significar muchas cosas. La demora media por detención es la medida de eficacia principal utilizada en la evaluación del nivel de servicio en las intersecciones semaforizadas.

*La demora por detención* es el tiempo que un vehículo permanece parado en una cola mientras espera su turno para pasar por la intersección.

*La demora media por detención* es la demora por detención total de todos los vehículos de un acceso o de un grupo de carriles durante un tiempo dado dividida entre el volumen total que entra en la intersección por el acceso o grupo de carriles durante el mismo período, expresada en segundos por vehículo.

Se utiliza la demora por detención porque es un parámetro relativamente sencillo de medir y conceptualmente simple. La demora debida a la circulación a velocidades inferiores a las deseadas es difícil de obtener pues requeriría la determinación de una velocidad deseada razonable para cada segmento de carretera.

#### 5.4. MEDIDAS DE TIEMPO DE RECORRIDO Y DEMORA.

Una medida del comportamiento del tráfico en un tramo determinado de carretera es el tiempo empleado por los vehículos en recorrerlo; por ello se busca obtener el valor medio de su tiempo de recorrido.

Existen diversos procedimientos para medir tanto los tiempos de recorrido como las demoras. Un método poco exacto se puede emplear tanto en tramos cortos como en demoras de intersecciones y es el siguiente: se cuenta el número de vehículos que hay en el tramo en intervalos de tiempo cortos (de menos de un minuto) y se calcula el valor medio en un período largo. Si se divide ese valor medio por la intensidad de tráfico se obtiene el tiempo medio de recorrido. En las intersecciones se cuenta el número medio de vehículos parados y se divide por la intensidad de tráfico para obtener el tiempo de demora.

En tramos largos lo que se hace es colocar en la entrada y salida de mismo equipos de observadores que anotan matrículas y el instante en que entra y sale cada vehículo. Por comparación se obtienen los tiempos empleados por los vehículos y se halla el tiempo de recorrido medio.

Otra forma de medir tiempos de recorrido y demoras en intersecciones de tramos largos es el empleo de un vehículo que haga el recorrido y con personal con cronómetro que en una serie de puntos de control anote tiempos empleados y distancias recorridas.

La velocidad del vehículo puede regularse bien procurando llevar la velocidad de la media de los vehículos (método del coche medio) o bien por el método del coche flotante (igual número de coches adelantados que el de coches que le adelantan) que no siempre es fácil de obtener. Se hacen entre 5 y 10 recorridos con el vehículo y se obtienen los tiempos medios de recorrido.

Cuando se trata de obtener tiempos de recorrido en tramos de carreteras con sistemas de gestión de tráfico se utilizan métodos automáticos para la obtención de los mismos. El método más preciso es el que se realiza mediante el reconocimiento de matrículas en cámaras de video situadas en diversas secciones de los tramos que se consideren. Se analizan de forma continua las imágenes captadas buscando la aparición de un vehículo. Una vez capturada la imagen del vehículo ésta pasa por un sistema de reconocimiento de caracteres (OCR) que determina la matrícula del vehículo que ha pasado. Cuando el procesador tiene los caracteres de la matrícula, éstos se envían al servidor del sistema que será el que realice el tratamiento posterior. En el sistema de cálculo se parte de diversos OCR's a lo largo de la carretera. Cada OCR envía los datos hacia un servidor. El servidor contrasta los datos recibidos con todos aquellos puntos que componen un recorrido, calculando, al encontrar coincidencias de matrículas en los diversos puntos, el tiempo que ha tardado en producirse esta coincidencia y mediante un sencillo cálculo determinar el tiempo medio de recorrido en el tramo considerado.

## **6. RELACIONES ENTRE LA INTENSIDAD, VELOCIDAD Y DENSIDAD**

Se define como intensidad de tráfico al número de vehículos que pasan a través de una sección fija de la carretera por unidad de tiempo. Las unidades más usadas son las de vehículos/hora (intensidad horaria) y vehículos/día (intensidad diaria).

Se entiende por densidad de tráfico al número de vehículos que ocupan un tramo de carretera de longitud dada, en un instante concreto. Se suele medir en vehículos/km. El valor máximo de la densidad tiene lugar cuando todos los vehículos están en fila sin huecos entre ellos y lógicamente depende de la longitud media de los vehículos.

Es difícil medir directamente la densidad en el campo, pues es necesario contar con un punto elevado desde el que se pueda fotografiar, videofilmar, o divisar tramos de vía de longitud significativa. Se puede calcular, sin embargo a través de la velocidad media de recorrido y de la intensidad de circulación, que son de más sencilla medición. A partir de la fórmula:

$$I = V \times D$$

en donde:

I = intensidad de circulación, en veh./h

V = velocidad media de recorrido, en km/h; y

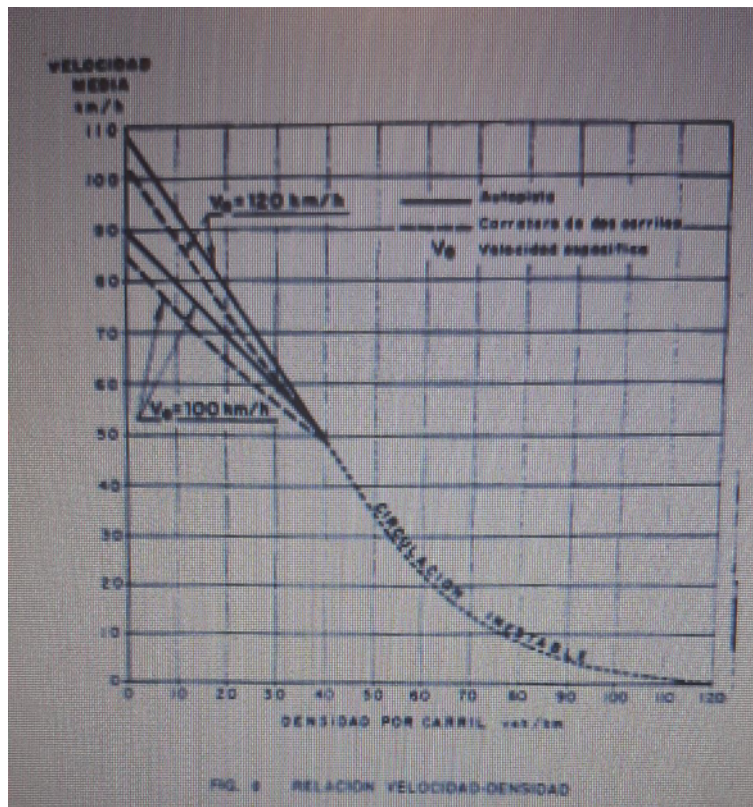
D = densidad, en vh./km.

La densidad es un parámetro crítico en la descripción de las operaciones de tráfico. Describe la proximidad entre los vehículos, y refleja la libertad de maniobra dentro de la corriente de tráfico.

En los sistemas de control de tráfico se usa frecuentemente el parámetro de ocupación de carretera como sucedáneo de la densidad porque es de más fácil medida. Se define como ocupación espacial la proporción de la longitud de carretera ocupada por los vehículos y la ocupación en tiempo como la proporción de tiempo que una sección transversal de carretera está ocupada por vehículos.

### 6.1. RELACIÓN BÁSICA ENTRE LAS TRES MAGNITUDES.

Entre las magnitudes de tráfico anteriormente estudiadas existen relaciones que permiten deducir una de ellas a partir de las otras. La ecuación  $I = V \times D$  que expresa la relación básica entre los tres parámetros descriptores de la corriente de tráfico se deduce de la propia definición de dichas magnitudes. Aunque dicha ecuación permite algebraicamente la existencia de un número infinito de combinaciones de velocidad y densidad para cada intensidad, existen otras relaciones que limitan la variedad de condiciones de circulación posibles en un tramo determinado y que se han obtenido empíricamente a partir gran número de datos recogidos de estudios reales.

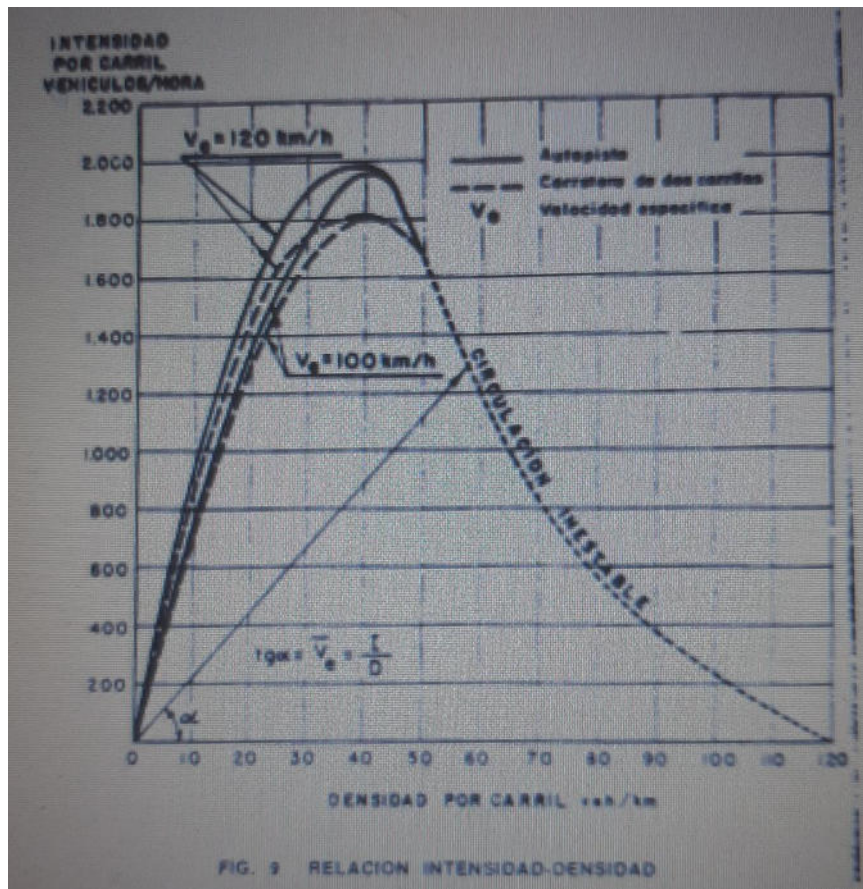


## 6.2. RELACIÓN ENTRE VELOCIDAD Y DENSIDAD

El tipo de relación entre velocidad y densidad que se deduce de la fórmula anterior indica que:

- si la densidad es pequeña, los pocos vehículos que están en la carretera pueden circular muy separados y llevar la velocidad que quieran sus conductores sin que ningún otro interfiera, con lo que la velocidad de los vehículos podría ser tan alta como lo permitieran las características de la carretera y del propio vehículo.
- Con densidades mayores hay dificultades para mantener la velocidad deseada por la existencia de vehículos más lentos; es decir, a mayor densidad de tráfico menor velocidad media.

## 6.3 RELACIÓN INTENSIDAD – DENSIDAD



- Cuando no existen coches sobre la vía, la densidad es cero, y la intensidad de circulación, también es cero. La velocidad es puramente teórica en este estado, y sería cualquiera que el primer conductor seleccionara - probablemente un valor elevado -.
- Cuando la densidad tiende al máximo posible todos los vehículos se paran (la velocidad es cero), la intensidad de circulación es también cero, puesto que no hay movimiento y los vehículos no pueden “pasar” por un perfil de la carretera. Se denomina *densidad de atasco* a aquella densidad para la que cesa todo movimiento.

Entre estos dos puntos extremos, la dinámica del flujo viario produce un efecto maximizador. Al incrementarse la densidad desde cero, la intensidad de circulación también aumenta al existir más vehículos sobre la carretera. Mientras esto sucede, la velocidad empieza a declinar (debido a la interacción entre vehículos). Esta reducción es virtualmente despreciable para bajas densidades e intensidades de circulación. Según aumenta la densidad se alcanza un punto para el que la velocidad se reduce precipitadamente. La intensidad máxima se alcanza cuando el producto de la densidad creciente por la velocidad decreciente produce un flujo inferior al de la situación precedente.

La máxima intensidad de circulación de cualquier vía es su capacidad. La densidad a la que esto se produce se denomina *densidad crítica*, y la velocidad a la que esto ocurre se denomina *velocidad crítica*. Al aproximarse a la capacidad, la circulación se hace más inestable al existir menos intervalos en el tráfico utilizables, y cualquier perturbación producida por vehículos que se incorporen o abandonen la vía, o de maniobras de cambio de carril internas, crean unas alteraciones que no pueden ser amortiguadas o disipadas eficazmente. En consecuencia, es difícil mantener la explotación de la vía en el entorno de la capacidad durante períodos largos de tiempo sin que se formen colas, siendo casi inevitable el flujo forzado o el colapso. Debido a esto, la mayoría de las estructuras viales se proyectan para una operación en volúmenes inferiores a la capacidad.

Según se observa en la figura, cualquier intensidad distinta de la capacidad puede obtenerse en dos estados diferentes -uno en el que la velocidad es alta y la densidad baja, y el otro con una densidad alta y una velocidad baja-.

Se considera **inestable** la parte completa de las curvas correspondiente a altas densidades y bajas velocidades. Esta situación se corresponde con un flujo forzado o en colapso. Corresponde a un nivel de servicio F.

La parte de las curvas correspondiente a bajas densidades y altas velocidades es la región de circulación **estable**. El análisis de capacidad se centra en esta región. Los niveles de servicio A a E se definen en la parte estable de las curvas, situándose en vías de circulación continua el nivel de servicio E, correspondiente al límite máximo de circulación, en el punto de capacidad de la sección que se estudia.

Comparando las curvas correspondientes a distintas carreteras se observa que difieren en la parte de las velocidades altas, mientras que son aproximadamente iguales para velocidades bajas.

#### 6.4.- RELACIÓN ENTRE VELOCIDAD E INTENSIDAD

Esta relación es mucho más sencilla de obtener en la práctica, ya que es más fácil medir velocidades e intensidades que densidades. Por otra parte la intensidad es una magnitud que define la demanda de tráfico en la carretera, siendo por tanto un dato básico, mientras que la velocidad media define la calidad de la circulación.

Frecuentemente, el problema será deducir las condiciones de tráfico (caracterizada por la velocidad), conociendo la demanda de tráfico (definida por la intensidad). Por tanto estas relaciones entre velocidad e intensidad tienen una gran importancia práctica.

De los estudios empíricos se deducen curvas con la peculiaridad de que para cada valor de la intensidad se presentan dos velocidades distintas: una elevada y una menor. La



parte superior de la curva corresponde a una circulación libre y estable, mientras que la parte inferior corresponde a una circulación congestionada e inestable.

Comparando las curvas correspondientes a distintas carreteras, se observa que difieren en la parte superior, para velocidades altas, y son muy parecidas en la parte inferior, para congestión. La rama superior de la curva es la más interesante a efectos prácticos, ya que la rama inferior corresponde a condiciones de circulación que se trata de evitar.

Considerando la rama superior de la curva se observa que la velocidad es prácticamente constante para intensidades bajas y se reduce cuando la intensidad se va acercando a la capacidad de la carretera considerada. También se ha estudiado como depende la curva de la composición del tráfico (proporción de vehículos pesados y de las características de la carretera (sección transversal, pendientes etc.). de todo ello depende la determinación de la capacidad de las carreteras (que es el número máximo de vehículos que tienen una probabilidad razonable de atravesar la sección durante un período dado de tiempo).

