

TEMA 5

PARÁMETROS FUNDAMENTALES DEL TRÁFICO I. CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO DE 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. CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO DE TRÁFICO, VARIACIÓN, DISTRIBUCIÓN Y COMPOSICIÓN.
2. INTENSIDAD DE TRÁFICO. DEFINICIÓN.
3. DENSIDAD DE TRÁFICO.
5. RELACIONES ENTRE LA INTENSIDAD, LA VELOCIDAD Y LA DENSIDAD.
6. TIEMPOS DE RECORRIDOS Y DEMORAS.

1.- CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO DE TRÁFICO, VARIACIÓN, DISTRIBUCIÓN Y COMPOSICIÓN.

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.

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 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 D_i .

D_i : 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: El ciclo anual se estudia lógicamente utilizando la IMD, y en el caso de España, resulta evidente como el valor de IMD presenta un lomo a lo largo del periodo estival en secciones de carretera interurbana, y un valle en ese mismo periodo en carreteras de acceso de ciudades de interior (en el caso de polos turísticos costeros este valle es un pico), que se repite con ciclo anual.
- 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: Se analiza utilizando la IMD, y puede ser un ejemplo representativo de este tipo de variación el incremento de tráfico los viernes, sábados y domingos en entornos de espacios comerciales y de ocio.
- Ciclo diario: En este caso, se utilizaría la Intensidad horaria (Ih), y su evolución. Pueden ser un ejemplo las horas punta (de mañana o tarde) que se producen en los accesos a grandes conurbaciones urbanas, y que se repiten recurrentemente de manera similar cada día. 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 principalmente.

La DISTRIBUCIÓN de la frecuencia con que se repite un determinado valor del parámetro de intensidad se utiliza para el proyecto y explotación/operación de una carretera. No sería lógico dimensionar el firme, pavimento, radios de curvatura, número y ancho de carriles, tomando en consideración sólo el valor máximo de la intensidad horaria que soportará una vía, sino que lógicamente debe ponderarse la importancia, y ello se realiza empleando el concepto de distribución.

Será por tanto preferible escoger un valor de la intensidad horaria, o diaria según sea el caso que es sobrepasado durante un valor determinado de horas o días respectivamente a lo largo del año.

En la práctica, para el caso de la intensidad horaria, se considera aquella que sólo se sobrepasa durante 100 o 150 horas al año en función de los requerimientos, denominándose como IH100 e IH150.

En el caso de la operación del tráfico, el conocimiento de la distribución de la intensidad resulta vital, y más que en la planificación y proyecto, los valores máximos tienen una consideración mayor ya que pueden generar problemas graves de demoras o seguridad vial que pudieren ser resueltos o mitigados mediante una adecuada gestión de la capacidad viaria existente, y no mediante un incremento de la capacidad viaria construyendo nueva infraestructura por ser poco costo-efectivo al ser un evento de repetición mínima. Este es el fundamento paradigmático de la diferencia entre medidas duras (construir infraestructura nueva) y blandas (gestionar la oferta existente e influir en la demanda) para la gestión del tráfico.

La vigente 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).

Hasta ahora se ha hablado de la distribución temporal, si bien también merece la pena

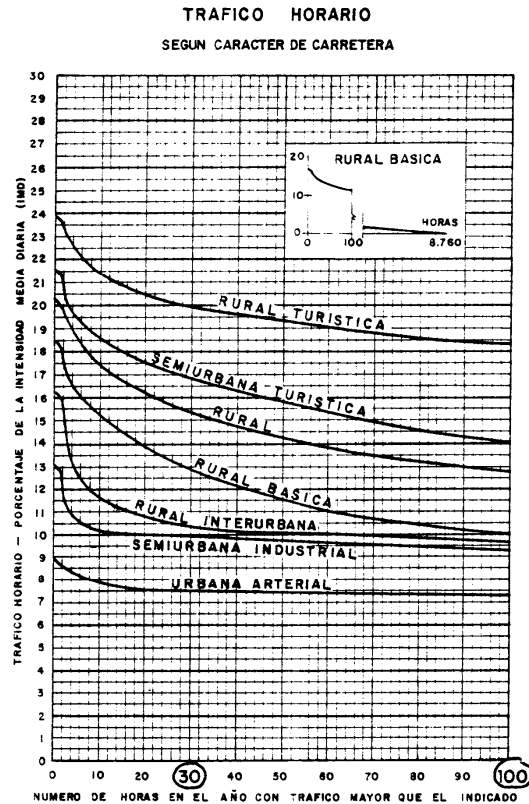


FIG. 5 CURVAS DE INTENSIDADES HORARIAS CLASIFICADAS

tratar la DISTRIBUCIÓN espacial del tráfico dentro de una carretera concreta.

La intensidad de tráfico suele considerar la intensidad de tráfico total en ambos sentidos, por lo que para un análisis detallado, un técnico debería cerciorarse de encontrar el valor de intensidad que representa el sentido de circulación que desea estudiar, tratando de evitar la hipótesis de reparto al 50% ya que esto no ocurre para todos los periodos analizados como se ha visto con los ciclos temporales.

Asimismo, la DISTRIBUCIÓN puede considerarse desde el punto de vista del carril, siempre y cuando la vía disponga de más de un carril por sentido de circulación. En autovía y autopista, según el Reglamento General de Circulación, el carril izquierdo sólo se utilizará para efectuar adelantamientos, algo en lo que la Dirección General de Tráfico incide con campañas divulgativas frecuentes. A su vez, y suponiendo un cumplimiento adecuado de la norma, la distribución de la intensidad entre carriles dependerá fundamentalmente de la COMPOSICIÓN del tráfico, es decir, del porcentaje de vehículos pesados que circulan por la carretera. Una mayor presencia de estos vehículos, cuyas velocidades máximas legales de circulación son menores que la de los ligeros (turismos y

motocicletas) según el artículo 48 del Reglamento General de Circulación, impondrá una mayor necesidad de adelantamiento y por tanto de ocupación del carril izquierdo (o central en el caso de que existan 3 carriles por sentido). Este tipo de tráfico y las maniobras de adelantamiento asociadas generan interacciones intervehiculares que provocan una ralentización de la circulación y una reducción de la capacidad máxima de la vía. Debido a esto, la DGT establece una serie de restricciones a la circulación para vehículos pesados, así como la paralización de obras en curso, a fin de maximizar la capacidad de la vía y minimizar la afección a la circulación. Las restricciones relativas a 2014 pueden consultarse en: http://www.dgt.es/Galerias/el-trafico/recomendaciones/operaciones-especiales/doc/2014/Navidad2014-2015_Restricciones_IV.pdf

Aunque ya se haya mencionado, merece la pena tratar brevemente el concepto de COMPOSICIÓN del tráfico. Más allá de conocer el número de vehículos que atraviesan una determinada sección de carretera, la Autoridad de Tráfico o Gestor del Tráfico, debe conocer las características de los vehículos, pudiendo realizarse con mayor o menor detalle en función de las necesidades.

Un operador concesionario de una vía de peaje, cuyas tarifas se asocian a la longitud, número de ejes, carga del vehículo, y tipo de vehículo, deberá disponer de sistemas automáticos de detección en tiempo real que permitan la tarificación precisa y ágil para garantizar la máxima fluidez y comodidad.

En casos generales, la DGT de modo sistemático mide la composición del tráfico clasificando los vehículos en base a umbrales de longitud de los mismos, identificando como vehículos pesados aquellos que superan el umbral y ligeros el resto.

Con la implantación de sistemas de detección y clasificación vehicular basados en visión artificial, esta composición podrá ser cada vez más precisa y detallada, sin una inversión de recursos especialmente elevada. Asimismo, gracias a la lectura de la matrícula, el acceso al Registro de Vehículos de la DGT es viable tanto en tiempo real como en gabinete, pudiendo realizar una clasificación vehicular viable tanto para la realización de estudios de tráfico, gestión del tráfico y vigilancia, basada en nivel de emisiones, tara, antigüedad, código de Industria, tipo DGT, etc.

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 de pesados. Evidentemente, estas composiciones están sujetas a variaciones temporales.

2.- INTENSIDAD DE TRÁFICO. DEFINICIÓN.

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, diseño geométrico, pavimento, planes de conservación, estudios de demanda, etc)

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. También es ésta, junto con la intensidad infrahoraria (15min) la que se utiliza para la gestión del tráfico.

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

Q₁₅ = el volumen durante los 15-min punta de la hora, en v/15 min.

3.- 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.

Resulta interesante destacar el hecho de que a pesar de que el Manual de Capacidad de Carreteras (HCM2010) define unos valores de la densidad, no es menos cierto que el comportamiento de los conductores es cambiante, y la tolerancia a la distancia intervehicular difiere según las culturas y valores de las sociedades. La aceptación de una

menor distancia de seguridad también es más común en ciudades donde la congestión es frecuente y los tiempos de viaje elevados, de modo que se alteran las relaciones entre parámetros de tráfico convencionales, siendo una manera la de respetar distancias intervehiculares menores que los teóricos.

Si se desea modelizar el funcionamiento del tráfico en un emplazamiento determinado, resulta fundamental llevar a cabo una toma de datos exhaustiva a fin de calibrar el comportamiento real de los usuarios.

4. RELACIONES ENTRE LA INTENSIDAD, LA VELOCIDAD Y LA DENSIDAD.

Las características de la movilidad se ven afectadas por múltiples factores entre los que se destacan los siguientes:

- Tipo de vía (geometría, ancho de carril, nº de carriles, ancho de arcén, separación de sentidos, etc).
- Tipo de vehículo (vehículo ligero, vehículo pesado, vehículo de dos ruedas, vehículo de tracción mecánica, etc).
- Tipo de conductor y de conducción (conducción agresiva, conducción eficiente, conducción neutral, conducción conservadora, etc).
- Interacción vehículo-vía.
- Interacción conductor-vehículo.
- Interacción conductor-vía.

Desde el punto de vista de los parámetros de tráfico, existen relaciones entre éstos que se representan por medio de representaciones gráficas y numéricas conocidas, y aunque cambiantes según la carretera y sus características, y su emplazamiento, se pueden determinar valores generales para una aplicación cautelosa.

RELACIÓN FUNDAMENTAL.

Entre las principales características de la circulación estudiadas existen relaciones que permiten deducir una de ellas a partir de los valores de las otras.

En lo que sigue se supone que los vehículos se mueven a lo largo de un tramo de carretera, sin interrupciones a la circulación. Por consiguiente, si los vehículos llegan a detenerse, será debido a las propias circunstancias del tráfico y no a medidas exteriores, como pueden ser las indicaciones de un semáforo o de un agente de la circulación.

La relación fundamental es: intensidad igual a densidad por velocidad media espacial ($I = DV$). Esta relación liga por tanto las tres magnitudes fundamentales y permite

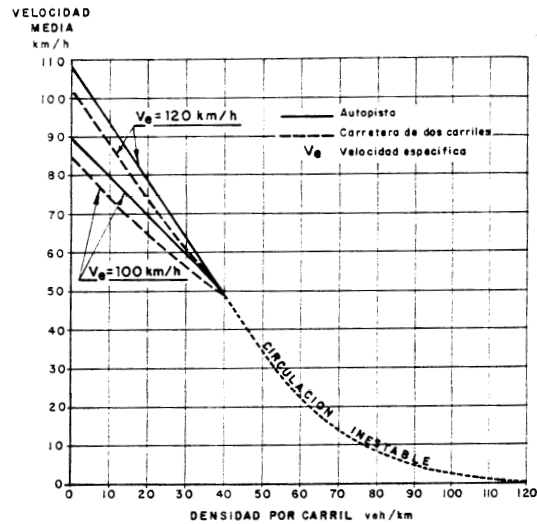


FIG. 8 RELACION VELOCIDAD-DENSIDAD

calcular una de ellas (generalmente la densidad) en función de las otras dos.

RELACIÓN VELOCIDAD – DENSIDAD.

Evidentemente, si la densidad fuera muy pequeña, casi nula, los pocos vehículos que estuvieran en la carretera podrían circular muy separados y llevar la velocidad que quisieran sin que ningún otro les interfiriera. Con densidades mayores, los vehículos tendrían más dificultades para mantener la velocidad deseada porque encontrarían con cierta frecuencia vehículos más lentos delante de ellos que les impedirían mantener su velocidad. Por tanto al aumentar la densidad de tráfico la velocidad media disminuye. En el límite, cuando se alcance la densidad máxima (es decir, cuando la carretera esté totalmente ocupada por vehículos, parachoque contra parachoque), será absolutamente imposible mover un vehículo sin golpear al que le precede, y la velocidad de todos los vehículos será igual a cero. La velocidad media resulta así una función de la densidad que alcanza un valor máximo cuando la densidad es casi cero, y disminuye constantemente al aumentar la densidad hasta llegar a anularse cuando la densidad de tráfico alcanza su valor máximo. Hablaremos de zonas, curvas o regiones de circulación inestable cuando tengan altas densidades y bajas velocidades, mientras que será estable en caso contrario.

Esta función variará de unas carreteras a otras, pero indudablemente la influencia del tipo de carretera será mayor cuando la densidad es baja; en estas condiciones la velocidad no depende de otros vehículos, sino exclusivamente de las características de la carretera. Por el contrario, cuando la densidad es alta, los conductores deben preocuparse principalmente de los vehículos que les preceden, por lo que la velocidad dependerá más de las condiciones del tráfico que de las de la carretera. Si se representa la variación de la velocidad media en función de la densidad de tráfico (midiéndola en vehículos por Km y carril), se obtienen curvas como las de la Fig. 8, en las que las mayores variaciones entre tipos de carretera se producen en las zonas de baja densidad.

RELACIÓN INTENSIDAD – DENSIDAD

Cuando la densidad sea nula, también lo será la intensidad: y cuando la densidad alcance su valor máximo, por anularse la velocidad media, se anulará también la intensidad. Entre ambos extremos, la intensidad tendrá valores positivos, y por consiguiente debe alcanzarse un valor máximo de la intensidad. Representando la intensidad en función de la densidad resultan funciones convexas con un máximo para un cierto valor de la densidad. Como en el caso de la relación velocidad densidad, estas curvas serán diferentes para las distintas carreteras, presentándose mayores diferencias en la zona de baja densidad, mientras que serán similares en la zona cercana a la densidad máxima.

El valor máximo de la intensidad para un tramo de carretera se conoce como capacidad de la carretera, y la densidad para la que se obtiene se llama densidad crítica. Cuando la densidad es menor que la crítica, el tráfico se mantiene relativamente fluido y estable, en el sentido que si se produce alguna pequeña perturbación que aumente momentáneamente la densidad de tráfico, tiende a disiparse y volver a la situación anterior. Por el contrario, cuando la densidad es superior a la crítica, las perturbaciones tienden a producir un empeoramiento de la situación que puede llegar a la detención total del tráfico. Por ello, los puntos de la rama ascendente del diagrama corresponden a condiciones de tráfico que se pueden considerar aceptables, ya que los vehículos se mantienen moviéndose a una velocidad que, aunque no sea la deseable, no sufrirá excesivas variaciones. Por el contrario, los puntos de la rama descendente corresponden a una circulación inestable en que se producen constantemente paradas y avances y las velocidades oscilan entre cero y valores siempre reducidos.

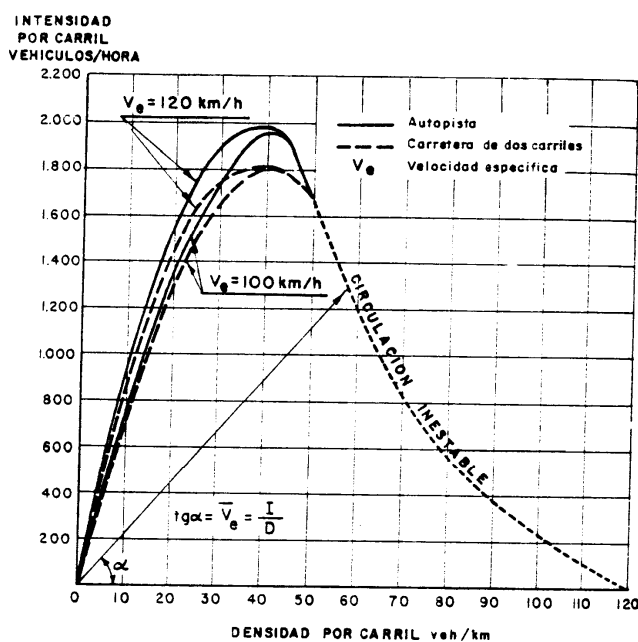


FIG. 9 RELACION INTENSIDAD-DENSIDAD

El diagrama que representa la intensidad en función de la densidad se conoce como diagrama fundamental del tráfico, y en él puede obtenerse para cualquier punto la intensidad (ordenada), densidad (abscisa) y velocidad media (pendiente de la recta que une el origen con el punto en cuestión).

Se estima que la densidad crítica suele ser del orden del 30% al 40% de la densidad máxima.

RELACIÓN VELOCIDAD – INTENSIDAD.

Mientras la intensidad de tráfico es baja, los conductores pueden mantener la velocidad que ellos juzgan más adecuada, mientras que cuando aumenta la intensidad la velocidad de cada conductor viene determinada en gran parte por la de los demás, produciéndose una disminución de la velocidad media. Cuando esta intensidad es muy alta y la carretera llega a estar congestionada, la velocidad resulta poco influida por otros factores, como las características de la carretera o el tipo de vehículo.

Esta relación es mucho más sencilla de obtener en la práctica, ya que es más fácil medir velocidades e intensidades que densidades. Además, la intensidad de tráfico es una magnitud que define la demanda de tráfico en la carretera, y es por tanto un dato básico, mientras que la velocidad es la magnitud que mejor define el funcionamiento de la circulación desde el punto de vista de los conductores.

Como en el caso de la curva intensidad densidad, se presentan dos velocidades distintas para cada valor de la intensidad, una relativamente elevada, y otra menor (Fig. 10). 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 apreciablemente en la parte superior (velocidades altas), mientras que son parecidas en la parte inferior. La rama superior de la curva, que es la más interesante a efectos prácticos, ya que la rama inferior corresponde a condiciones inaceptables, puede considerarse aproximadamente lineal, variando de unas carreteras a otras su inclinación y ordenada en el origen.

Se han realizado numerosos estudios para determinar cómo depende la relación velocidad intensidad de la composición del tráfico (porcentaje de vehículos pesados) y características de la carretera (sección transversal, pendientes, etc.). Dichos estudios forman la base de los procedimientos para determinar la capacidad de las carreteras.

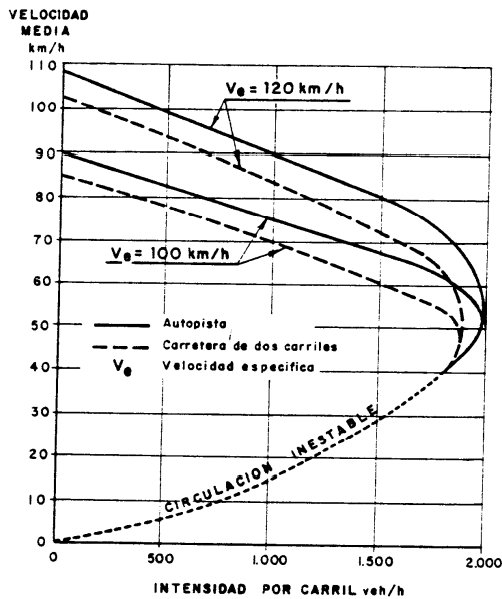


FIG. 10 RELACION VELOCIDAD-INTENSIDAD

5. TIEMPOS DE RECORRIDOS Y DEMORAS.

Para hablar de tiempos de recorrido, resulta fundamental considerar el tercer parámetro fundamental del tráfico, que es la velocidad, y que en el anterior apartado ya se ha considerado al tratar las relaciones fundamentales entre parámetros. Es lógico que a mayor velocidad menor tiempo de recorrido y menor demora.

La OCDE establece que el **coste por congestión en Europa asciende aproximadamente a 135 millones de euros anuales.**

La velocidad es una variable fundamental del tráfico y la de definición más compleja. Cuando hablamos de velocidad, podemos referirnos a la de un vehículo determinado, a la de un grupo de vehículos o a una magnitud que tiene en cuenta las circunstancias de la circulación y de la vía.

La velocidad de un determinado vehículo puede definirse de tres formas fundamentales:

- “Velocidad local o instantánea”, es decir la velocidad de un vehículo al atravesar una determinada sección de una vía.
- “Velocidad de Circulación” (V_c), que es el cociente entre la distancia recorrida en un tramo determinado y el tiempo en que el vehículo está **en movimiento**.
- “Velocidad de recorrido” (V_r), que es el cociente entre la distancia recorrida en un tramo determinado y el tiempo que transcurre desde el instante en que el vehículo inicia el

viaje hasta que llega a su destino, **incluyendo las posibles detenciones y retrasos debidos al tráfico.**

- La “velocidad del percentil 85” es aquella que sólo es sobrepasada por el 15% de los vehículos, considerando sólo los de turismo que son los más rápidos. Esta velocidad suele ser alrededor de un 20% superior a la velocidad media. Se suele considerar como velocidad de proyecto para muchos estudios de trazado o regulación, puesto que si se considerara la velocidad media como velocidad de proyecto, ésta sería superada por el 50 por ciento de los vehículos.
- La “velocidad de proyecto” es aquella que se toma como base para definir los elementos geométricos de la vía: radios de curvas, horizontales y verticales, distancias de visibilidad y peraltes, y que depende del trayecto, socioeconomía del territorio, jerarquía viaria, relieve, meteorología, etc. La velocidad de proyecto permite definir las características mínimas del trazado de un tramo. Cuanto mayor sea la velocidad de proyecto, mayores serán las dimensiones de los elementos de la carretera considerada y menores sus curvaturas e inclinaciones. Los valores de la velocidad de proyecto suelen depender de los siguientes factores:
- La “velocidad de servicio”, que es aquella a 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 razonables de seguridad. Este concepto de velocidad tiene gran interés en la definición de la capacidad y de los niveles de servicio de los distintos tipos de calles y carreteras.

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 a su vez 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.

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.

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.

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.

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.

Como es sabido, **entre los objetivos de la DGT se encuentra la de garantizar la fluidez de la circulación**, que queda representada nítidamente por **un indicador que es la velocidad media de circulación**.

Cada vez más, el ciudadano y **usuario de la red viaria requiere una información de tráfico más actualizada, precisa y comprensible para la toma de decisiones pre-viaje (día/hora de salida, modo de transporte a utilizar, itinerario) y decisiones en-ruta (itinerario, realización de paradas intermedias), y además de las decisiones, estar informado acerca de las incidencias y sus consecuencias traducidas en tiempos de viaje a fin de permanecer en todo momento informado, estando demostrado que un conductor informado es más paciente y su comportamiento al volante más ajustado a norma** ¹.

Actualmente, la DGT trabaja en la elaboración de un “indicador de fluidez” objetivo numérico, que permita conocer en tiempo real el estado de circulación en España en tiempo real y en situaciones pasadas.

La captación de los datos de velocidad, **la DGT los recoge de manera “discreta” por medio de equipamiento ITS de sensorización del tráfico**: Espiras inductivas, Lectores de Matrícula y Cinemómetros. Con este tipo de equipamiento se obtienen datos de velocidades instantáneas, velocidades de recorrido, velocidades medias de circulación, percentiles de velocidad (ej. V85), etc, de carácter objetivo y preciso.

No obstante, los lectores de matrícula, a pesar de recoger datos de manera discreta en el tiempo y en el espacio, la conexión entre secciones de entrada (inicio de tramo) y de salida (final del tramo), proporciona suficiente información para obtener datos de tiempos de recorrido en un tramo continuo.

Asimismo, por medio de la visión a través de las cámaras de televisión (CCTV), a través de los Centros de Gestión, el operador obtiene información directa visual de la velocidad de circulación y por tanto del estado de circulación a lo largo de un tramo de vía.

En efecto, la siguiente figura refleja la traducción de la imagen del tráfico que se obtiene de las cámaras en el Nivel de Servicio definido por el Manual de Capacidad de Carreteras (HCM2010).

¹ Durand-Raucher, Y., Y. Yim, and J. Ygnace. Traffic Information and Driver Behaviour in Paris Region. *Proc., Pacific Rim Transtech Conference*, Seattle, Wash., ASCE, Vol. 1, 1993, pp. 167–169.

Bonsall, P. W. *Driver Response to VMS Signs: Results of VLADIMIR Surveys*. Deliverable 4, WP2, University of Leeds, Leeds, United Kingdom, 1995.

A	<ul style="list-style-type: none"> • La velocidad de los vehículos es la que elige libremente cada conductor • Cuando un vehículo alcanza a otro más lento puede adelantarlo sin sufrir demora • Condiciones de circulación libre y fluida 	
B	<ul style="list-style-type: none"> • La velocidad de los vehículos más rápidos se ve influenciada por otros vehículos • Pequeñas demoras en ciertos tramos, aunque sin llegar a formarse colas • Circulación estable a alta velocidad 	
C	<ul style="list-style-type: none"> • La velocidad y la libertad de maniobra se hallan más reducidas, formándose grupos • Aumento de demoras de adelantamiento • Formación de colas poco consistentes • Nivel de circulación estable 	
D	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad reducida y regulada en función de la de los vehículos precedentes • Formación de colas en puntos localizados • Dificultad para efectuar adelantamientos • Condiciones inestables de circulación 	
E	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad reducida y uniforme para todos los vehículos, del orden de 40-50 km/h • Formación de largas colas de vehículos • Imposible efectuar adelantamientos • Define la capacidad de una carretera 	
F	<ul style="list-style-type: none"> • Formación de largas y densas colas • Circulación intermitente mediante parones y arrancadas sucesivas • La circulación se realiza de forma forzada 	

Ilustración 1: Equivalencia del estado “visual” del tráfico con los Niveles de Servicio.

La DGT utiliza para la categorización de los estados del tráfico un código de colores que a su vez se corresponde con los Niveles de Servicio de la anterior ilustración y que se indica a continuación:

CÓDIGO COLORES DGT	ESTADO CIRCULACIÓN	NIVEL DE SERVICIO
Blanco	Fluida	A
Verde	Estable	B –C
Amarillo	Estable intermitente	D
Rojo	Saturada	E
Negro	Interrumpida	F

Como ya se ha mencionado, la detección de la velocidad se efectúa en la actualidad de manera discreta, sin embargo, la situación óptima será la detección continua de la velocidad. Cada vez la tecnología evoluciona más rápido y la conectividad tiende a ser global, de modo que cada persona/usuario utiliza dispositivos conectados a internet e incluso geoposicionados, al igual que los vehículos, que cada vez se encuentran dotados de más tecnología que igualmente los convierte en “**vehículos conectados**”, que pasan a ser auténticos sensores de tráfico e incidencias en tiempo real a lo largo de su recorrido, y que pueden asimismo transmitir a otros vehículos, o a terceras partes (Centros de Gestión de Tráfico, operadores de servicios de tráfico, etc).

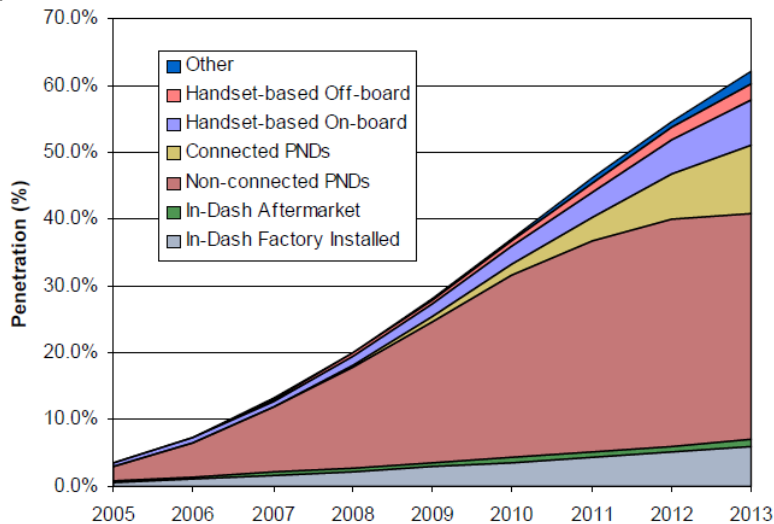
De este modo, realizando tramificaciones de la red, se podrá conocer cuál es la velocidad de circulación en cada tramo, y no solo eso, sino que a partir de las fluctuaciones en el tiempo del valor de la velocidad, podrán también inferirse incidencias que producen una caída de la velocidad anormal para el periodo analizado.

Si se emplean detectores discretos (espiras), deberá realizarse una extrapolación del dato de velocidad (medido en una sección determinada) al resto del tramo, con los consecuentes errores que esto supone en el cálculo de tiempos de recorrido.

Igualmente, los vehículos pueden transmitir información que incluye desde el estado mecánico, la activación de ABS, actuación de limpiaparabrisas, encendido de luces, número de ocupantes, etc. que permitirán gestionar el tráfico y detectar incidencias como accidentes, meteorología adversa, o comportamientos de riesgo.

La definición de cómo se transmitirá la información generada y recogida por el vehículo conectado, y qué partes podrán acceder a ella y para qué usos, aún le espera un recorrido que se resolverá a medio plazo, pero que sin duda generará cambios en la concepción de la detección de los parámetros fundamentales del tráfico y otros como los meteorológicos.

La siguiente ilustración muestra la evolución de la penetración de dispositivos de conexión incorporados en el vehículos, ya sean aftermarket, instalados de fábrica, y bien a bordo o portátiles. En cualquier caso la penetración a fecha de 2015 alcanza ya prácticamente el 70% de los vehículos.



Las siguientes dos ilustraciones muestran el estado del tráfico según Google-Traffic e InfoTransit, dos servidores de información de tráfico en tiempo real que operan en España y que se basan en datos de:

- Operadores de telefonía.
- Flotas de vehículos (aseguradoras, transportistas, clubes de automovilistas, etc).
- Sensores de tráfico fijos (titular de la vía, operador de tráfico).
- Sistemas de Navegación GPS.

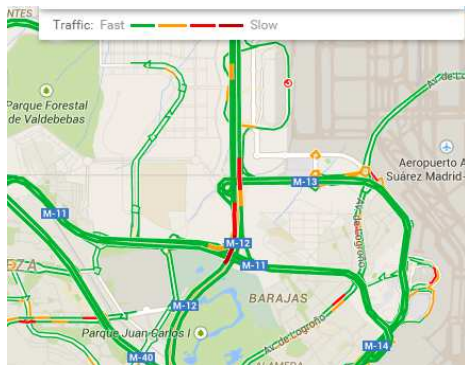


Ilustración 2: Google Traffic

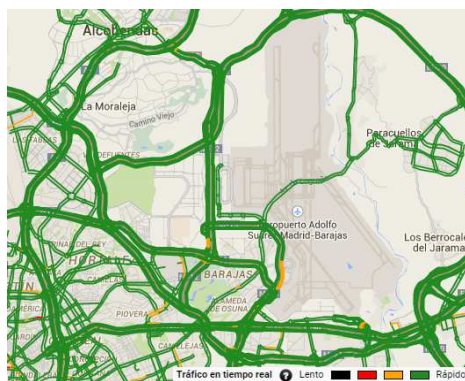


Ilustración 3: InfoTransic – RACC/Inrix

La siguiente ilustración muestra una captura de pantalla de la aplicación colaborativa de conductores Waze que georreferencia incidencias de tráfico en la red viaria (congestión, meteorología, accidentes, controles policiales, etc).

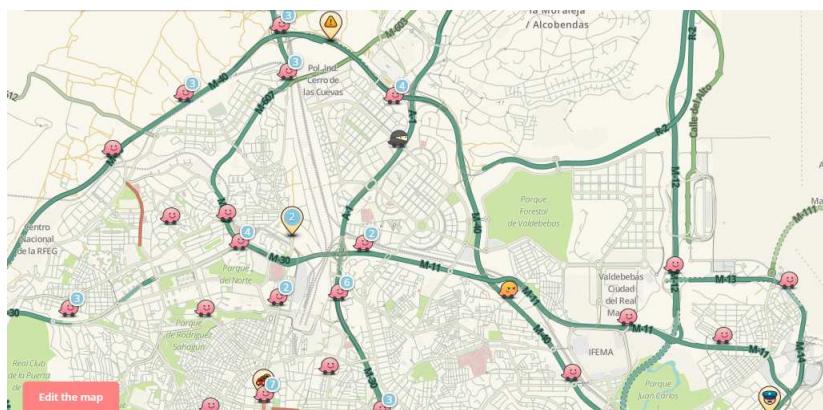


Ilustración 4: Waze app.

La siguiente ilustración muestra una captura de pantalla de la aplicación oficial de la DGT eTraffic, en la que se concentra información con distribución espacial “discreta” de:

- Sensores de tráfico.
- Estaciones Meteorológicas.

- Incidencias de tráfico de LINCE.
- Cámaras de tráfico.
- Mensajes en los Paneles de Mensaje Variable (PMV).
- Ubicación de cinemómetros fijos.
- Obras

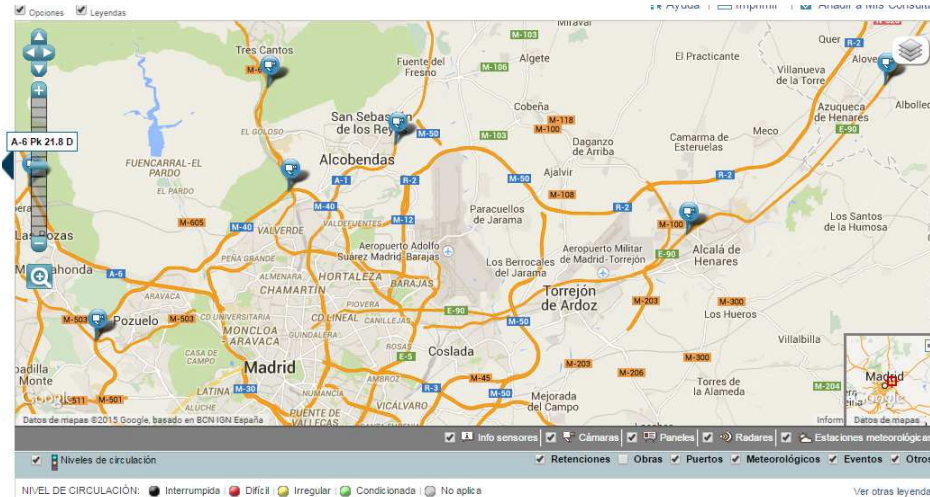


Ilustración 5: etraffic - DGT

Ya se ha mencionado que una mayor velocidad no siempre implica mayor intensidad, por lo que **la gestión del tráfico ha de buscar un equilibrio entre intensidad y velocidad a fin de garantizar el coste mínimo de congestión, y para ello minimizar el valor de vehículo-hora perdido en referencia a un valor conocido con condiciones de tráfico libre.**

La siguiente ilustración muestra cuál es la información suministrada al usuario por Highways Agency, la entidad encargada de la gestión del tráfico en Reino Unido. Se puede observar que se proporciona información tramificada continua del valor de la velocidad en función de unos umbrales en base a la demora (demora < 15min, 15min < demora < 30min; demora > 30min) con un código de colores sencillo:

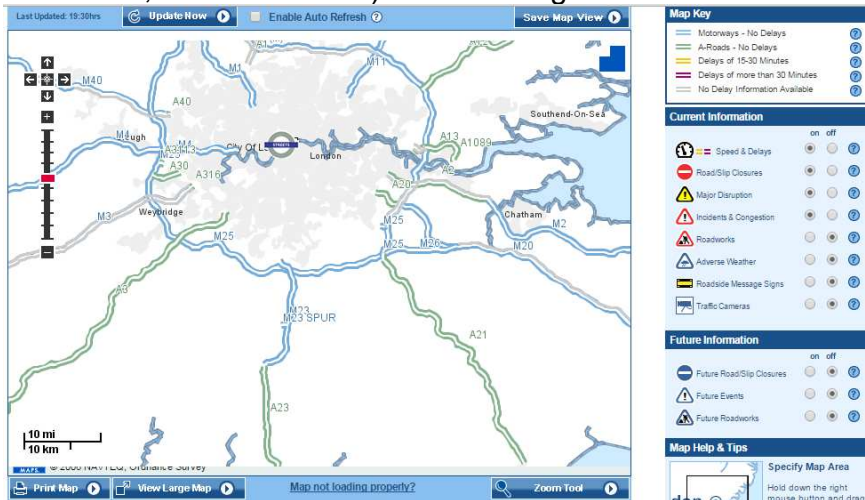


Ilustración 6: Información en tiempo real en la red principal de Inglaterra (www.trafficengland.com)

Actualmente, múltiples operadores proporcionan información del estado del tráfico basándose en la velocidad de circulación, basándose en datos ya citados como navegadores u operadores de telefonía. Sin embargo, esta información no es completa ya que no cubre la totalidad de vehículos circulantes, bien porque existe una porción de vehículos “no conectados” en el parque, o bien porque sus fuentes no cubren la totalidad de navegadores, operadores de telefonía o flotas de vehículos. Por ello, cualquier dato cuantitativo que mida la DEMORA global de los usuarios deberá ser calculada en base al universo de vehículos, conocido únicamente por medio de sensores de tráfico.

La demora podrá proporcionar un indicador de eficiencia de la red viaria y de competitividad de una sociedad en su conjunto.

Dado que las inversiones deben resultar costoefectivas, quizás en aquellos tramos de red viaria donde se concentre la mayor parte de la demanda (red Transeuropea (red Core y red Comprehensive; <http://ec.europa.eu/transport/infrastructure/tentec/tentec-portal/main.jsp>), accesos a grandes áreas metropolitanas, redes estratégicas, pueda sensorizarse densamente mediante equipamiento ITS que capte parámetros de tráfico del universo de vehículos circulantes, mientras que en el resto de viario, donde el coste de instalación, mantenimiento y explotación de este tipo de equipamiento es más elevado por cuestiones obvias, podría gestionarse el tráfico por medio de fuentes de información de tráfico “conectadas” como las vistas previamente que no requieren instalación física de equipos, o en su caso su coste es mínimo (ej. detectores bluetooth).

<http://www.inrix.com/scorecard/>

<http://www.tomtom.com/lib/doc/pdf/2014-05-14%20TomTomTrafficIndex2013annualEur-mi.pdf>

ANEXO

(TEMA 5)

Periodo	Volumen (v)	Intensidad de Circulación (v/h)
5:00 - 5:15	1.000	4.000
5:15 - 5:30	1.200	4.800
5:30 - 5:45	1.100	4.400
5:45 - 6:00	1.000	4.000
	4.300	

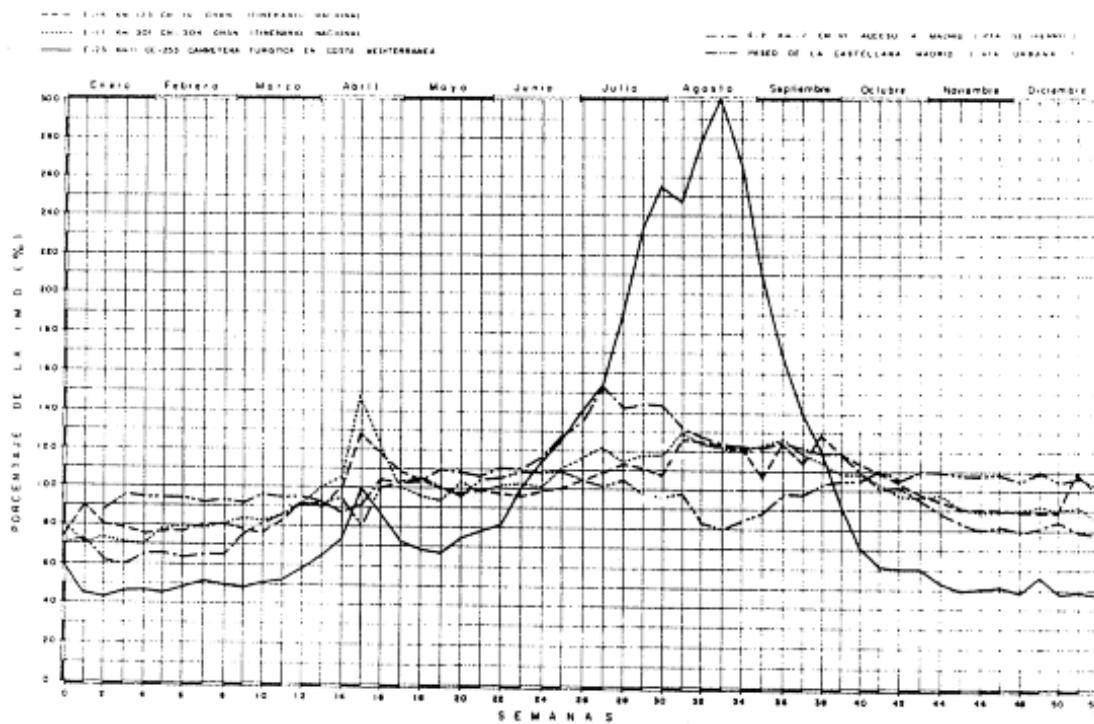


FIG. 1: EJEMPLO DE VARIACIÓN ANUAL DEL TRÁFICO

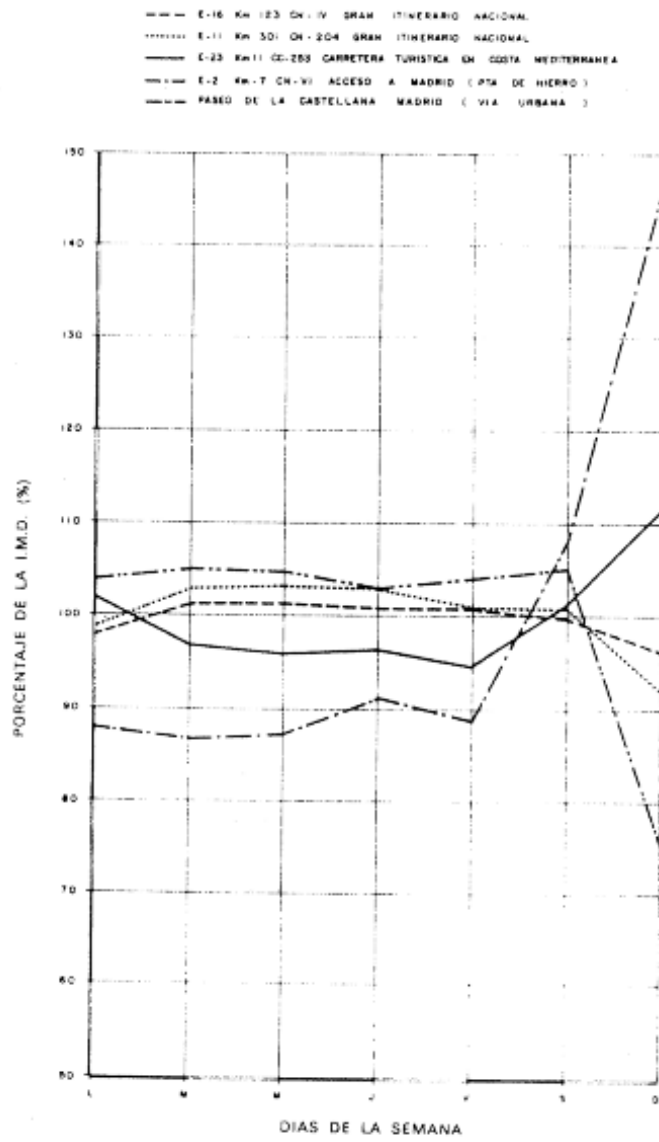


FIG. 2: EJEMPLO DE VARIACIÓN SEMANAL EN VARIAS CALLES Y CARRETERAS.

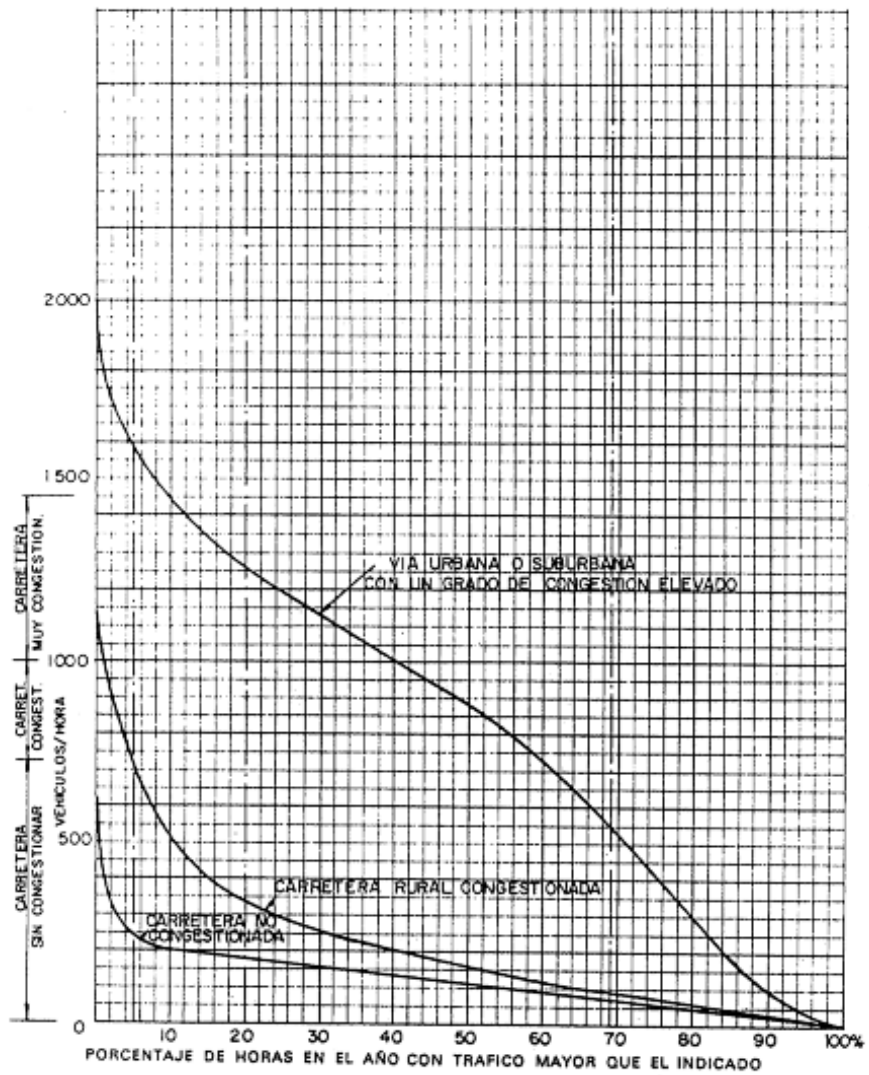


FIG. 4: DISTRIBUCIÓN ANUAL DEL TRÁFICO HORARIO EN CARRETERAS CON DISTINTO GRADO DE CONGESTIÓN