

# Simulación del Tráfico Urbano

Una vez que se ha finalizado con la introducción de la Planificación del Transporte, se hace una introducción, igual que la anterior con carácter genérico, de la Simulación del Tráfico Urbano.

## **2.7.- Modelos de Simulación Microscópica.**

### **2.7.1.- Objetivos.**

El objetivo principal de este capítulo es el análisis de las características fundamentales de los modelos de simulación microscópica de tráfico, profundizando de forma especial en los modelos utilizados para imitar el comportamiento de los vehículos. Se presentan los nuevos modelos, incluidos en TRAMOS, que afinan y generalizan las reacciones de los conductores. El capítulo finaliza con algunos modelos de simulación mesoscópica.

### **2.7.2.- Introducción a los modelos de simulación microscópica.**

Los modelos de simulación microscópica de tráfico urbano se basan en modelos de simulación de tiempo discreto combinados con modelos de eventos discretos. La **simulación de tiempo discreto** se emplea para describir el comportamiento de los conductores en el desplazamiento. La **simulación por eventos** se aplica al comportamiento de semáforos y sucesos ocasionales que ocurren en el viario e influyen en los conductores.

El desarrollo de todo proceso de simulación está sujeto a un conjunto de etapas tales como:

- 1) Especificar el problema y el objeto del modelo.
- 2) Especificar aquello que el sistema debe estudiar.
- 3) Desarrollo del modelo.
- 4) Calibración del modelo.
- 5) Validación del modelo.

## **2.8.- Modelo de Datos para un Simulador Microscópico de tráfico.**

### **2.8.1.- Introducción.**

Los modelos de simulación microscópica se emplean para reproducir con gran detalle el comportamiento del tráfico sobre el viario urbano. Los modelos de simulación pueden estructurarse en dos bloques o componentes, que denominaremos como **estáticos** y **dinámicos**. Los componentes estáticos corresponden a la definición con gran precisión de las entidades que representan el viario, tales como calles, carriles, semáforos, etc. Los componentes dinámicos hacen referencia al comportamiento de elementos que interactúan entre sí y con los elementos estáticos (fundamentalmente vehículos).

Los modelos de simulación microscópica y el software resultante son costosos de desarrollar, precisando un mantenimiento exhaustivo en relación a los modelos de simulación macroscópica y mesoscópica.

### **2.8.2.- Requerimientos de los Simuladores Microscópicos.**

Los simuladores microscópicos intentan reflejar la realidad con un alto grado de precisión. Para describir el entorno de simulación es necesario observar la realidad e identificar los componentes que la constituyen y caracterizan. Como se ha comentado con anterioridad, en el caso de la simulación de tráfico, existen dos tipos de componentes :

- 1) **Componentes estáticos**: son aquellos que permiten describir el escenario objeto de simulación. Fundamentalmente nos referimos a las infraestructuras tales como viario, aparcamientos, modos de transporte y rutas de transporte público.
- 2) **Componentes dinámicos** : son aquellos que varían durante la simulación y determinan la evolución del proceso de simulación microscópico. Tanto su definición como su comportamiento (modelos) deben ser muy detallados ya que caracterizan la precisión del modelo de simulación. Nos referimos fundamentalmente a vehículos, semáforos e incidencias.

### **2.8.3.- Componentes de un Simulador Microscópico.**

#### **2.8.3.1.- Introducción.**

La representación del viario comprende la definición de las estructuras de datos necesarias en el simulador. En la mayoría de los simuladores microscópicos el viario se modela mediante un grafo,  $G(V,A)$  (dirigido o no dirigido, dependiendo del simulador), donde las calles están representadas mediante aristas o arcos del grafo y las intersecciones o cruces están representados por nodos del grafo. En el viario existen además otras muchas entidades. Dependiendo del nivel de detalle del simulador y de los objetivos marcados por sus creadores el número de entidades definidas podrá ser superior o inferior.

Veamos a continuación las entidades más importantes que suelen contener los simuladores. La metodología que se va a seguir para la representación de las características de las entidades es la llamada orientada a objetos (**MOO**). La MOO es un nuevo estilo de análisis que facilita la comprensión del sistema y su conversión para el desarrollo del software. Booch (1991) estudió la aplicación de la MOO para el desarrollo de los sistemas de gestión del tráfico y en especial para viarios grandes, distinguiendo las siguientes etapas: definición de la base de datos, interfaces de usuario y dispositivos de control en tiempo real.

### **2.8.3.2.- Definición y estructura de los componentes del Simulador Microscópico.**

**1.- NODOS :** el viario está representado por un grafo  $G(V,A)$  que contiene un conjunto de vértices y arcos. Los vértices ( también llamados nodos) representan las intersecciones del viario.

**2.- TRAMOS :** las aristas o tramos representan la calles del viario.

**3.- CARRILES :** los tramos están compuestos por carriles. Estos pueden ser de diferentes tipos, permitir el paso a determinados vehículos y presentar características especiales.

**4.- GIROS :** las intersecciones son puntos de unión de los tramos. Para los vehículos actúan como medio de selección del tramo que conduce a su destino final. Dichas intersecciones representan el punto de unión entre tramos, no todos los tramos que llegan a una intersección están comunicados a través de ella. Las comunicaciones se indican por medio de giros permitidos en el nodo. Un giro habilita la posibilidad de circulación de vehículos entre dos tramos incidentes en el nodo.

**5.- TIPO DE VEHÍCULO :** cada vehículo que se desplaza por el viario presenta una características propias del mismo. Resulta conveniente agrupar las entidades en tipos, de manera que estos recojan las características fundamentales.

**6.- VEHÍCULO :** todo simulador debe contener información sobre los vehículos ( componente dinámico) que se desplazan por la red. La entidad vehículo contiene información del tipo:

- Número identificativo de vehículo.
- Código del tramo.
- Número de carril.
- Aceleración o deceleración del vehículo.
- Posición.
- Velocidad del vehículo y velocidad deseada por este.
- Número de vehículo. Este índice indica cual es el vehículo precedente.
- Código ruta.
- Número de tramo.
- Tipo de vehículo (coche, bus, motocicleta, camión).
- Tipo de conductor (agresivo o pasivo).

**7.- TRAYECTORIAS VEHÍCULOS :** en el caso de determinadas herramientas de simulación, ciertos vehículos no se desplazan por el viario sin sentido, sino que tienen un origen y un destino. El destino se alcanza siguiendo una determinada ruta. Las rutas se componen de un conjunto de tramos por donde circulan los vehículos.

**8.- APARCAMIENTO :** los vehículos que se desplazan por el viario pueden detenerse en diferentes zonas llamadas aparcamientos. Se podrán considerar en superficie ( en cordón o batería, parkings vigilados...) o subterráneos ( de rotación o sin limitación temporal).

**9.- AUTOBÚS :** los sistemas de simulación suelen el sistema de transporte público mediante entidades diferenciadas del resto de los vehículos. Los autobuses urbanos son entidades tratadas por separado. Entre los atributos que suelen definirse para los autobuses están:

- Código del autobús: permite identificarlo en el viario.
- Código ruta: ruta asignada al autobús.

**10.- CONTAMINACIÓN :** la información sobre tasas de consumo de combustible y tasas de emisión se recogen en esta tabla. Las tasas de emisión varían según la aceleración, velocidad y tipo de vehículo.

**11.- DETECTORES :** los detectores situados en los carriles de los tramos del viario proporcionan información sobre el flujo de vehículos que circula por los tramos. Los atributos que suelen contener son:

- Código del detector (número identificativo).
- Código del tramo donde se encuentra el detector.
- Número de carril.
- Tipo de detector.
- Longitud del detector.
- Número de vehículos que han pasado por este durante cierto tiempo.
- Posición del detector.
- Estado del detector.

**12.- INCIDENTES :** los simuladores de tráfico microscópico suelen contemplar la posibilidad de incidentes en el viario. Los atributos de la entidad son:

- Código del tramo.
- Lista de carriles afectados por el incidente.
- Código de incidente.
- Posición del incidente.
- Longitud.
- Duración del incidente.

**13.- SEÑALES SEMAFÓRICAS :** el viario contiene diferentes tipos de señales. Entre las más importantes se encuentran los semáforos que controlan el buen funcionamiento de la circulación. Los atributos que suelen contener son:

- Código señal.
- Código del tramo.
- Número de carril.
- Tipo de señal (peatonal o normal).
- Número de fases. Las señales están divididas en fases que especifican los estados que tiene cada señal en un instante determinado.
- Tiempo de ciclo. Suma de los tiempos de cada una de las fases que componen la señal.
- Índice fase. Indica la fase activa en el instante actual.
- Listas fases. Muestra cada una de las fases que componen la señal, especificando el color, duración y tiempo necesario para cambiar de una fase a otra.
- Estado fase. Información del estado de cada fase, tal como apagado, verde, ámbar etc.

**14.- PARÁMETROS GLOBALES :** los simuladores contienen tablas que especifican datos globales. Entre los parámetros que suelen incluirse están:

- Situación de la aplicación. Ruta de acceso a la aplicación y los datos.
- Limitaciones. Número máximo de entidades que puede tener el simulador.
- Parámetros del simulador. Entre ellos podemos destacar:
  - Parámetros empleados en los modelos de cambio de carril y aceleración.
  - Tiempo de simulación.

## **2.9.- Modelo de Aceleración.**

### **2.9.1.- Introducción.**

Los modelos de aceleración describen el comportamiento de los conductores con relación a la velocidad y aceleración desarrolladas. El comportamiento del conductor presenta diferentes características dependiendo de las señales del viario, proximidad de semáforos, obstáculos, vehículos precedentes, etc.

Los modelos de aceleración se clasifican en:

- Modelos de seguimiento de vehículos: se emplean para mostrar el comportamiento de un conductor cuando está influido por el vehículo que le precede.
- Modelos de aceleración General: se emplean para aquellos casos donde el conductor no está influido por un vehículo precedente, como por ejemplo cuando actúa en función de semáforos, obstáculos o se mueve con plena libertad.

Estos modelos se han estudiado extensivamente desde los años 50. La estimación de los mismos se ha realizado empleando información con alto grado de detalle, tales como velocidad del vehículo y su precedente, distancia entre vehículos y aceleración.

Hasta los años 80 los investigadores habían prestado atención al estudio de los modelos de aceleración en régimen de seguimiento de vehículos y poca atención al resto. A partir de entonces cobró más importancia el estudio de los modelos de aceleración en flujo libre.

### **2.9.2.- Notación.**

Se describe a continuación la notación empleada en los modelos de aceleración:

- $L_n$  : longitud del vehículo n.
- $x_n(t)$  : posición del vehículo n en el instante t.
- $v_n(t)$  : velocidad del vehículo n en el instante t.
- $a_n(t)$  : aceleración del vehículo n en el instante t.
- T : tiempo de reacción ( tiempo que transcurre desde que el conductor observa un suceso hasta que actúa en consecuencia.).
- $x_{n+1}(t) - x_n(t) - L_{n+1}$  : distancia de separación.
- $v_{n+1}(t) - v_n(t)$  : velocidad relativa entre dos vehículos.
- $V_n^{des}$  : velocidad deseada.
- $(a_{n,max}^+), (a_{n,max}^-)$  : aceleración y deceleración máxima.

### **2.9.3.- Distancia de Seguridad.**

Un aspecto muy importante en los modelos de aceleración es la determinación de la distancia entre dos vehículos consecutivos, que será empleada para evitar las colisiones. La distancia entre vehículos se define como el espacio desde un punto del vehículo precedente (n+1) al mismo punto del vehículo sucesor (n). Normalmente se seleccionan los parachoques delanteros como puntos de referencia.

Los primeros estudios realizados entre 1924 y 1941 se publicaron en Highway Capacity Manual (1952) y mostraban la relación directa entre el espacio y velocidad en la estimación de la capacidad de los carriles.

### **2.9.4.- Modelos de Aceleración.**

Los modelos de seguimiento de vehículos son característicos de la mayoría de los modelos de simulación, reflejan la interacción de dos o varios vehículos ( precedente y seguidor) que circulan en el mismo carril. La interacción entre vehículos se realiza mediante mecanismos de estímulo y respuesta, como indica la siguiente expresión, desarrollada a finales de la década de los 50 :

$$\text{Respuesta (t+T)} = \text{Sensibilidad (t)} \times \text{Estímulo (t)}$$

t = instante de tiempo en que se observa el vehículo.

T= tiempo de reacción para el conductor del vehículo.

Respuesta (t+T) = aceleración aplicada en el instante t.

El primer modelo de aceleración general fue desarrollado por Gipps (1981). Se aplican dos regímenes, uno primero de seguimiento de vehículos cuando este está influido por otros y su velocidad depende de la del vehículo precedente. El segundo es un régimen en flujo libre donde el vehículo no se encuentra influido por ningún otro vehículo. El modelo de Gipps obtiene la aceleración máxima para un conductor tal que su velocidad no exceda la velocidad deseada, y la distancia entre vehículos sea la de seguridad mínima. El modelo lo usa el simulador AIMSUM2 (Referencias).

Subramanian (1996) desarrolló un modelo de aceleración normal que contemplaba el comportamiento de los conductores en dos regímenes, seguimiento de vehículos y flujo libre. La distancia entre los vehículos determina el régimen donde se encuentra el conductor en cualquier instante de tiempo. En el régimen de seguimiento de vehículos, se supone que el conductor sigue al vehículo predecesor y en flujo libre el conductor intenta obtener la velocidad deseada.

Benekohal y Treiterer (1988) desarrollaron un modelo de simulación llamado CARSIM, que simula el tráfico bajo tres condiciones, normal, parada y en arranque. La aceleración de los vehículos se calcula dependiendo de las cinco posibles situaciones en que se encuentre el vehículo, para posteriormente obtener la velocidad y posición. Las situaciones contempladas por CARSIM son:

- El vehículo se encuentra desplazándose pero su velocidad es inferior a la deseada.
- El vehículo ha alcanzado su velocidad deseada.
- El vehículo estaba parado y comienza el movimiento.
- El movimiento del vehículo se encuentra influido por un modelo de aceleración de seguimiento de vehículos, debido a que la distancia entre él y el vehículo precedente es inferior a la distancia de influencia. El modelo contempla las restricciones de colisión.
- El vehículo se encuentra influido por un modelo de aceleración de seguimiento de vehículos, pero no contempla las restricciones de distancia mínima para evitar colisiones.

Yang y Koutsopoulos (1996) desarrollaron un modelo de aceleración general empleado en el simulador MITSIM que contiene tres posibles situaciones:

- Situación de emergencia.
- Situación de seguimiento de vehículos.

- Situación en flujo libre.

- 

En régimen de emergencia, el conductor aplica la deceleración necesaria para evitar la colisión con el vehículo precedente e incrementa la distancia. La segunda situación aplica un modelo de seguimiento como el estudiado antes. Por último la situación en flujo libre se aplica cuando el vehículo no está influido e intenta alcanzar su velocidad deseada.

Zhang, Owen y Clark (1999) desarrollaron un modelo de aceleración general multi-régimen que contempla diferentes etapas:

- Modelo de seguimiento de vehículos. Emplean la expresión general de seguimiento del modelo no lineal de General Motors.
- Régimen no confortable, estado donde la distancia entre el vehículo y su precedente es superior a la deseada por el conductor.
- Régimen de flujo libre. El vehículo no está influido por ningún vehículo, obstáculo o señal.
- Régimen de emergencia. La distancia de separación entre el vehículo y su precedente es inferior a la de seguridad mínima.
- Régimen de influencia de señales de tráfico. El vehículo está influido por la señal de tráfico que regula la intersección a la que se aproxima.
- Régimen de salida de una intersección. Se produce cuando el vehículo se encuentra detenido en una señal y se inicia el movimiento.

En 1999, Kazi propone un nuevo modelo de seguimiento de vehículos que junto con un modelo de aceleración en flujo libre conforma su modelo de aceleración general.

Entre los años 1992-1997 se ha desarrollado el modelo de aceleración para el simulador Paramics. Está basado principalmente en el modelo de aceleración descrito por Hans-Thomas Fritzsche (1994).

El vehículo y el conductor son agrupados en una sola identidad (DVU) que tiene unas características propias tales como espacio o tiempo de separación deseado entre vehículos. El tiempo de separación es fijado a un valor medio de 1 segundo aunque existen variaciones dependiendo de las condiciones.

La unidad vehículo-conductor (DVU) modifica la velocidad acorde a la percepción sobre la velocidad de la DVU precedente. Los cambios suelen ser suaves, siguiendo funciones lineales, aunque pueden ser abruptas como consecuencia de detección de señales. El modelo de aceleración diferencia tres regímenes denominados Aceleración, Deceleración y de Seguimiento.

El modelo de aceleración introduce el concepto de punto destino que indica la distancia que la DVU desea mantener con el precedente.

Dicho modelo desarrollado por Paramics distingue 5 zonas de actuación dependiendo de la velocidad relativa y la distancia entre los vehículos. Para cada una de las zonas existe una expresión para la aceleración que es aplicada cuando las

condiciones de velocidad relativa y distancia correspondan con los límites prefijados en cada zona. El modelo de seguimiento corresponde con tres zonas del modelo de aceleración que llamaremos A, B y C.

#### **2.9.4.1.- Modelo de aceleración en flujo libre.**

Un vehículo se encuentra en esta situación cuando no existe ningún tipo de influencia sobre el vehículo o bien la entidad precedente, que ejerce influencia sobre el vehículo, se encuentra a una distancia superior a la distancia de influencia. Todos los autores coinciden en la forma de actuar cuando el vehículo se encuentra en estas condiciones, el vehículo comprobará su velocidad y si es inferior a la velocidad deseada acelerará con su aceleración lineal hasta alcanzar la velocidad máxima. Si la velocidad del vehículo es superior a la velocidad deseada, frenará con deceleración lineal, por último si la velocidad es igual a la velocidad deseada la aceleración será nula.

$$a_n = \begin{cases} a_{n,max}^+ & \text{Si } v_n < V_n^{des} \\ 0 & \text{Si } v_n = V_n^{des} \\ a_{n,max}^- & \text{Si } v_n > V_n^{des} \end{cases}$$

$a_{n,max}^+$  : máximo ratio de aceleración.

$a_n^-$  : ratio de frenada normal o deceleración.

$a_n$  : ratio de aceleración.

$V_n^{des}$  : velocidad máxima deseada por el conductor.

Otros consideran que la velocidad máxima coincide con la velocidad deseada y que la aceleración y deceleración que se aplica en la fórmula coincide con la aceleración y deceleración máxima que puede alcanzar el vehículo.

Pline (1993) establece que la aceleración máxima depende de las características de la calzada y de la velocidad actual de vehículo, es decir:

$$a_{GV}^+ = a_{LV}^+ - \frac{G \times g}{100}$$

G : grados de elevación de la calzada.

$a_{GV}^+$  : máxima aceleración a velocidad V para una calzada con G grados de elevación.

$a_{LV}^+$  : máxima aceleración a velocidad V para una calzada con 0 grados de elevación.

g : aceleración de la gravedad (9.8 m/s).

Hogema (1998) especifica que los conductores intentan alcanzar o mantener su velocidad deseada dentro de ciertos límites. Este establece en un tres por ciento el intervalo en que el conductor la acepta como velocidad deseada, es decir si la velocidad del vehículo es de 50 km/h, el conductor no acelerará y tampoco frenará si su velocidad está en el intervalo [ 48.5-51.5] km/h. La aceleración deseada por el conductor se puede expresar como:

$$a_{n,v}(t) = k(v_n(t) - V_n^{des})$$

$a_{n,v}(t)$  : aceleración deseada en el instante t .

$k$  : constante, normalmente toma valor de 0.1 y la unidad de  $s^{-1}$  .

Kazi (1999) propone un modelo de aceleración que recuerda la expresión de un modelo de seguimiento en flujo libre cuya expresión es :

$$a_n(t) = \lambda[v_n^*(t-T) - v_n(t-T)] + \xi_n(t)$$

$a_n$  : aceleración del vehículo que se desea calcular.

$\lambda$  : factor constante de sensibilidad.

$v_n^*(t-T)$  : velocidad deseada por el conductor.

$[v_n^*(t-T) - v_n(t-T)]$  : estímulo percibido por el conductor.

$\xi_n(t)$  : término aleatorio asociado con la aceleración del conductor n en el instante t.

Hasta el momento los modelos enunciados emplean la aceleración como resultado a obtener. Gipps (1980) propone un modelo de velocidad para mostrar el comportamiento de los vehículos.

Las primeras restricciones aplicadas al modelo son que no puede superarse la velocidad deseada ni tampoco la aceleración máxima del vehículo. Las restricciones pueden englobarse en una condición mediante la expresión :

$$v_n(t+T) = v_n(t) + 2.5 a_{n,max} T \frac{1 - v_n(t)}{V_n^{des}} \left( \frac{0.025 + v(t)}{V_n^{des}} \right)^{1/2}$$

$v_n(t)$  : velocidad del vehículo n en el instante t.

$a_{n,max}$  : aceleración máxima del vehículo n.

T : tiempo de reacción del conductor.

$x_n(t)$  : posición del vehículo n en el instante t.

$V_n^{des}$  : velocidad deseada del conductor del vehículo n.

#### **2.9.4.2.- Modelos Lineales de Seguimiento de Vehículos.**

Los modelos introducen la variación de velocidad (aceleración) como respuesta de los conductores a los estímulos recibidos. Un estímulo lógico puede ser la velocidad relativa media entre un vehículo y el anterior durante un corto periodo de tiempo.

$$V_{rel} = v_{n+1}(t) - v_n(t)$$

Los conductores buscan dos objetivos :

- No separarse del vehículo precedente. Búsqueda de estabilidad.
- Evitar la colisión con él.

#### 2.9.4.2.1.- Modelo de Seguimiento de Vehículo con Aceleración y Deceleración Lineal. (M.FAYCIN)

Dicho modelo se desarrolla para describir con mayor detalle el comportamiento de los vehículos en las siguientes condiciones:

- Modelar el comportamiento del conductor bajo condiciones de seguimiento y de parada de forma más realista.
- Mayor precisión en estados donde el vehículo debe frenar.
- Desarrollo de modelos donde el empleo de constantes que deben ser calibradas no sea necesario.

El modelo desarrollado combina dos etapas, un primer modelo de aceleración lineal junto a un segundo de aceleración constante. Los vehículos que desean detenerse inician la desaceleración gradual hasta quedar totalmente detenidos.

Los beneficios aportados por el modelo de aceleración lineal son:

- El proceso de aceleración es continuo, es decir la aceleración en el instante  $t$  está conectada con la aceleración del instante  $t-1$ .
- Las soluciones aportadas son continuas en el tiempo.
- El modelo define con mayor realismo el comportamiento de los conductores.

Los conductores reaccionan a cambios en la velocidad del vehículo precedente (estímulo) adaptando su velocidad (mediante la aceleración) a la velocidad del vehículo predecesor en orden a mantener la distancia de separación entre ellos. La estabilidad entre ambos vehículos se alcanza cuando las velocidades y aceleraciones de ambos son similares. La distancia puede expresarse como:

$$x_{n+1}(t) - x_n(t) = v_n(t) \times T$$

$T$  : tiempo necesario para desplazarse esa distancia.

El modelo de seguimiento de vehículos está basado en que los conductores alcancen la distancia de separación (obtenida por la fórmula anterior) para mantenerla posteriormente. Los principios de la simulación se pueden resumir en:

- Los vehículos intentan alcanzar las condiciones de separación con el vehículo precedente mediante un modelo de aceleración lineal.

- En cada instante los vehículos evalúan su situación, percibiendo variaciones de velocidad y aceleración del precedente. La reacción del vehículo se analiza transcurrido el tiempo de reacción.

Conociendo la velocidad y aceleración del vehículo predecesor podemos calcular el tiempo necesario para realizar una parada total, que podrá ser empleada para conocer la distancia mínima entre vehículos, es decir:

$$t = -\frac{v_{n+1}(t)}{a_{n+1}(t)}$$

Por otra parte la distancia entre vehículos viene dada por:

$$d_f = x_{n+1} - x_n + d_l - d_{buff}$$

$d_l$  : distancia existente entre los vehículos que permite al vehículo sucesor realizar una parada total en caso de parada del vehículo predecesor.

$\Delta x$  : distancia entre ambos vehículos.

$d_{buff}$  : distancia entre vehículos cuando estos están parados.

#### 2.9.4.2.2.- Modelo de Seguimiento de Vehículo con Aceleración y Deceleración Lineal. (Gazis)

Gazis en 1959 incorpora a los modelos lineales el espacio que debe existir entre los vehículos como parámetro en el término de sensibilidad. El modelo es el siguiente:

$$a_n(t+T) = \frac{\alpha}{x_{n+1}(t) - x_n(t)} [v_{n+1}(t) - v_n(t)]$$

$x_{n+1}(t) - x_n(t)$  : espacio entre los vehículos en el instante t.

$\alpha$  : parámetro que viene dado en m/s.

#### 2.9.4.2.3.- Modelo de Seguimiento de Vehículo con Aceleración y Deceleración Lineal. (Edie)

Edie (1961), indicó que el modelo de la expresión lineal para el cálculo de la aceleración presentaba dos limitaciones. La primera, desde el punto de vista del comportamiento, donde la teoría de seguimiento de vehículos no es aplicable para bajas densidades de tráfico. La segunda, la relación velocidad-densidad que indica que la

---

velocidad tiende a infinito cuando la densidad se aproxima a 0. Además Gazi demostró la relación entre la expresión de la aceleración en el seguimiento de vehículos con el modelo macroscópico de velocidad-densidad de Greenberg.

Para solucionar el problema Edie cambió el término de sensibilidad, quedando el modelo de la forma:

$$a_n(t+T) = \alpha \frac{v_n(t)}{(x_{n+1}(t) - x_n(t))^2} [v_{n+1}(t) - v_n(t)]$$

La sensibilidad es ahora proporcional a la velocidad del vehículo e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de separación con respecto al vehículo precedente. El modelo propuesto por Edie se aproxima mejor que el propuesto por Gazis (1959) cuando las densidades son bajas. Sin embargo el término de sensibilidad es todavía función de la velocidad del vehículo precedente, lo cual no es muy real cuando la densidad es baja. Edie comenzó el empleo de ecuaciones no lineales al introducir el exponente al cuadrado en el denominador de la sensibilidad, siendo el primero que sugería el estudio de modelos no lineales en el seguimiento de vehículos.

#### 2.9.4.2.4.- Modelo de Seguimiento de Vehículo con Aceleración y Deceleración Lineal. (Newel)

Newel (1961), en vez de emplear la formulación sensibilidad-estímulo para explicar la decisión de aceleración en régimen de seguimiento de vehículos, sugirió la siguiente relación entre la velocidad y el vehículo precedente :

$$V_n(t+T) = G_n[x_{n+1}(t) - x_n(t)]$$

$G_n$  : función cuya forma determina las especificaciones de los modelos de seguimiento de vehículos. La forma es diferente si se trata de decisiones de aceleración o deceleración.

#### **2.9.4.3.- Modelos no Lineales de Seguimiento de Vehículos.**

##### 2.9.4.3.1.- Introducción.

Estos modelos intentan describir el movimiento de los vehículos de una forma más realista, pero su utilización conlleva una mayor dificultad en el establecimiento de los criterios generales de estabilidad. En los modelos lineales, la respuesta aceleración es independiente del espacio entre los vehículos, es decir para una velocidad relativa determinada, la respuesta es la misma independientemente de que la distancia entre los vehículos sea pequeña o amplia.

Los modelos parten de la ecuación lineal  $a_n(t+T) = \lambda[v_{n+1}(t) - v_n(t)]$  suponiendo que  $\lambda$  no es una constante, sino que se trata de una función discreta o continua de la velocidad o distancia entre vehículos.

En esta ecuación, se tiene en cuenta que a menor distancia de separación entre un vehículo y el precedente (n y n+1), el conductor debe reaccionar de forma mas violenta, lo que se asemeja a la realidad.

A continuación se describen los modelos de aceleración de seguimiento desarrollados por otros autores.

#### 2.9.4.3.2.- Modelo no lineal de Gipps para el seguimiento de vehículos.

Es uno de los primeros modelos donde el objetivo principal de estudio es el cálculo de la velocidad y no la aceleración. Fue desarrollado por Gipps en 1980, y sus propiedades más interesantes son :

- El modelo pretende ser similar al comportamiento real del tráfico, no buscando una descripción analítica general.
- Los parámetros en el modelo deben corresponder a las características propias de los conductores y vehículos.
- El comportamiento del modelo debe ser bueno para diferentes valores del tiempo de reacción.

La expresión del modelo de aceleración de Gipps queda de la forma :

$$v_n(t+T) = \min \left\{ \begin{array}{l} v_n(t) + 2.5a_{n,max}^+ T \frac{1-v_n(t)}{V_n^{des}} \left( 0.0025 + \frac{v_n(t)}{V_n^{des}} \right)^{1/2} \\ a_{n,max}^- T + V \left( a_{n,max}^{(-)2} T^2 - a_{n,max}^- \left( 2[x_{n+1}(t) - L_{n+1} - x_n(t)] - v_n(t)T - \frac{v_{n+1}^2(t)}{a^-} \right) \right) \end{array} \right.$$

El modelo de obtención de velocidad de Gipps se aplica a MULTSIM para comprobar la efectividad y validez del modelo. También se emplea en el simulador AIMSUN2.

#### 2.9.4.3.3.- Modelo no lineal de Pitt para el seguimiento de vehículos.

El modelo ha sido desarrollado por la Universidad de Pittsburgh, y lo utiliza el simulador CORSIM. La primera relación entre un vehículo y su precedente consiste en mantener el espacio entre ambos vehículos, el cual está definido por:

$$x_{n+1}(t) - x_n(t) = L_{n+1} + kv_n(t) + 10 + bk(v_{n+1}(t) - v_n(t))^2$$

L : longitud del vehículo predecesor.

k : factor de sensibilidad que depende del tipo de conductor

b : constante empleada para velocidad relativa entre los vehículos . Se define como :

$$b = \begin{cases} 0.10 & \text{si } (v_{n+1}(t) - v_n(t)) \leq 0 \\ 0 & \text{si } (v_{n+1}(t) - v_n(t)) > 0 \end{cases}$$

La expresión de seguimiento de vehículos se expresa:

---

$$a_n(t+T) = 2 \frac{x_{n+1}(t) - x_n(t) - 10 - (k+T)v_{n+1}(t) - bk(v_{n+1}(t) - v_n(t))^2}{T^2 + 2kT}$$

La velocidad del vehículo se obtiene a partir de la aceleración, usando la expresión  $v_n(t+T) = v_n(t) + a_n(t) \times T$ . Para que el comportamiento del vehículo sea más real se introduce una constante al tiempo de reacción, quedando la ecuación de la velocidad:

$$v_n(t+T) = v_n(t) + a_n(t) \times (T - \phi)$$

$\phi$  : tiempo de reacción añadido.

#### 2.9.4.3.4.- Modelo no lineal de Bexelius para el seguimiento de vehículos.

Los modelos de seguimiento de vehículos utilizan la relación entre el vehículo en estudio y su predecesor para calcular la aceleración. Bexelius (1968) sugiere la posibilidad de que los vehículos no sólo reciben estímulos del vehículo precedente, sino que también del situado delante del precedente. Matemáticamente el modelo quedaría :

$$a_n(t+T) = \sum_{i=1}^N \lambda_i (v_i(t) - v_n(t))$$

$\lambda_i$  y  $v_i(t)$  : son la sensibilidad y la velocidad asociada al vehículo i-ésimo situado por delante del vehículo en estudio.

N : número de conductores.

#### 2.23.4.3.5.- Modelo no lineal de Subramanian y Kazi para el seguimiento de vehículos.

El modelo desarrollado por Kazi (1999) se basa en los trabajos realizados previamente por Subramanian (1996), que restringe el estímulo de la aceleración como función lineal de la velocidad del vehículo precedente, no contemplando el impacto de las condiciones del tráfico por delante del vehículo en estudio. Es decir, Kazi propone un modelo donde relaja la restricción del estímulo en el modelo de seguimiento de vehículo.

Las modificaciones se encuentran en los dos términos que componen la respuesta (Estímulo y Sensibilidad), que se transforman en funciones. Dicho modelo expuesto por Kazi se puede expresar como:

$$\text{Respuesta (t+T)} = \text{Sensibilidad (t)} \times \text{Estímulo (t)}$$

En el modelo propuesto, la aceleración aplicada al conductor n en el instante t es proporcional al estímulo. El tiempo de reacción varía para cada conductor y se modela como variable aleatoria. El término de sensibilidad es función de un conjunto de

variables y el del estímulo de la velocidad relativa entre el vehículo sucesor y predecesor.

#### 2.9.4.3.6.- Modelo de seguimiento de vehículos de Paramics.

Dicho modelos se refiere a:

- Por un lado al estado en el que la distancia entre la DVU ( unidad Vehículo/Conductor) precedente y seguidor es inferior a la distancia deseada, por ello el seguidor debe disminuir la velocidad.
- Por otro lado al estado donde el vehículo precedente se está alejando y por tanto aumentando la distancia entre ambos.
- Por último a la situación en que la distancia de separación disminuye o bien tiende a ser constante.

#### 2.9.4.3.7.- Modelo de seguimiento de vehículos en el simulador AASIM.

El modelo de aceleración de AASIM es un modelo que pretende que los conductores y vehículos tengan un comportamiento similar a la realidad. El comportamiento del conductor está basado en señales que éste aplica al vehículo. Las señales de control pueden ser de dos tipos, señales de frenada y aceleración. Las primeras pueden tomar valores entre 0 y 1 con valores próximos a 1 si el conductor aplica una mayor aceleración. El segundo tipo, de aceleración, presenta valores entre -1 y 1. Los valores inferiores a cero implican una disminución de la aceleración del vehículo, mientras que valores mayores que cero implican la aceleración del vehículo.

La velocidad deseada se expresa como:

$$v_n^{des}(t+T) = \begin{cases} \max(0, V_n^{des}(t) - a_n(t) \times V_{max}) & a_n(t) < 0 \\ \min(V_{max}, V_n^{des}(t) + a_n(t) \times V_{max}) & a_n(t) > 0 \end{cases}$$

Otra característica del procedimiento de aceleración es el método empleado para alcanzar la velocidad deseada. Para lograr este fin, los vehículos imponen una aceleración creciente y asintótica cuya expresión es:

$$v_n(t+T) = v_n(t) + V_n^{des}(t) \times (1 - e^{-\frac{t_0-t}{\tau}})$$

$\tau$  : tiempo constante asignado al vehículo.

Cuando el valor de frenada o deceleración es distinto de cero, el modelo aplica una deceleración lineal.

#### 2.9.4.3.8.- Extensiones a los Modelos para el seguimiento de vehículos.

Los modelos que hemos estudiado hasta ahora están basados en la premisa de que los vehículos reciben la información del vehículo precedente y actúan en consecuencia. Puede pensarse que los vehículos también reciben información de su predecesor. La ecuación de seguimiento de vehículo puede expresarse como :

$$a_n(t+T) = c_1 \{v_{n+2}(t) - v_{n+1}(t)\} + c_2 [v_{n+2}(t) - v_n(t)]$$

$c_1$  : sensibilidad a la diferencia de velocidad (velocidad relativa) entre el tercer y segundo vehículo.

$c_2$  : sensibilidad a la diferencia de velocidad entre el tercer y primer vehículo.

Fox y Lehman incorporan el efecto de un segundo vehículo en el modelo de simulación, quedando la expresión como:

$$a_n(t+T) = \alpha_1 v_{n+2}(t+T) \left\{ \frac{W_1 [v_{n+1}(t) - v_n(t)]}{[x_{n+1}(t) - x_n(t)]^2} + \frac{W_2 [v_{n+2}(t) - v_n(t)]}{[x_{n+2}(t) - x_n(t)]^2} \right\}$$

$\alpha$  : factor de sensibilidad.

$W_1 + W_2 = 1$ . Cuando  $W_1 = 1$  el segundo vehículo no afecta sobre la aceleración del primero.

Paramics incorpora una nueva extensión consistente en estudiar la velocidad máxima a la que un vehículo puede circular cuando realiza un giro. El modelo de aceleración limita la velocidad máxima de un vehículo en el giro mediante la expresión:

$$v_{max} < \sqrt{f_s g r}$$

$g$  : aceleración de la gravedad.

$f_s$  : coeficiente de fricción. Sus valores están entre 0.2 y 0.4. Es el radio de giro.

$v_{max}$  : velocidad máxima que puede desarrollar el vehículo en el cruce.

#### **2.9.4.4.- Modelo de Acercamiento a una Intersección u Obstáculo.**

Esta etapa se aplica cuando un vehículo se aproxima a una intersección y debe pararse en la línea de detención o bien al final de la cola de vehículos. Si la distancia entre la posición actual del vehículo y la línea de detención es menor o igual que la distancia normal de parada, el vehículo reaccionará aplicado la siguiente aceleración de frenada :

$$a_n(t+T) = -\frac{v_n^2(t)}{2(x_{n+1}(t) - x_n(t))}$$

$x_{n+1}$  : posición de la línea de detención o del último vehículo de la cola.

Si el estado del dispositivo de control está apagado, verde, o amarillo o bien en rojo y la distancia entre el vehículo y la línea de detención no permite la parada total, la expresión anterior se ignora y el vehículo se desplaza a través de la intersección.

Los modelos de aceleración en esta etapa sólo influyen sobre aquellos vehículos que se encuentran justamente delante del semáforo y a una distancia inferior a la de

influencia. Si algún vehículo se encuentra en zona de no influencia, el cambio de estado del semáforo no le afectará.

#### **2.9.4.5.- Modelo de arranque de vehículo.**

Esta etapa se produce cuando una señal cambia de rojo a verde, si el vehículo está situado al principio de la cola, o bien el vehículo se encuentra detenido en un aparcamiento y comienza el movimiento sobre el tramo. Los vehículos sucesores le siguen con la aceleración correspondiente al modelo de seguimiento de vehículos.

#### **2.9.5.- Estabilidad de los Modelos de Aceleración.**

Si tenemos a un conductor con tiempo de respuesta alto y esto provoca aceleraciones y frenadas bruscas en otros conductores, podemos decir que nos encontramos ante un comportamiento inestable. Se caracteriza por elevados tiempos de reacción y alta sensibilidad a las respuestas. En caso contrario estaríamos ante un comportamiento estable. Cuando el producto de la sensibilidad y el tiempo de reacción de un conductor es elevado existe una alta probabilidad de inestabilidad, en cambio si dicho producto es bajo la probabilidad de inestabilidad es mínima.

Según los estudios realizados por General Motors en los años 70-80, hay dos tipos de inestabilidades, las denominadas estabilidad local y asintótica. La estabilidad local hace referencia al comportamiento en régimen de seguimiento entre sólo dos vehículos, el precedente y sucesor. La estabilidad asintótica se refiere al comportamiento de un vehículo y un conjunto de vehículos seguidores.

El límite para diferenciar situaciones estables de inestables, lo fija el producto del tiempo de reacción y sensibilidad. Así, gracias a este parámetro, podemos distinguir tres tipos de inestabilidad local ( No Oscilatoria, Oscilatoria Amortiguada y Oscilatoria Incremental) y dos tipos de inestabilidad asintótica (Oscilatoria Amortiguada y Oscilatoria Incremental).

### **2.10.- Modelo de Cambio de Carril.**

#### **2.10.1.- Introducción.**

El movimiento de un vehículo en la red se ve determinado por su interacción con los vehículos adyacentes, respuesta a los dispositivos de control de tráfico,

velocidad deseada y carril de preferencia. Estas interacciones se producen en las decisiones de cambio de carril y de aumento y disminución de aceleración en un instante dado. Los modelos de seguimiento de vehículos calculan la aceleración o deceleración de un vehículo dependiendo de su relación con el precedente. Los modelos de cambio de carril representan las decisiones instantáneas de selección de carril.

Cuando el conductor toma la decisión de cambiar de carril, sigue las etapas:

- Decisión de realizar una maniobra de cambio de carril.
- Seleccionar el carril donde desea situarse.
- Comprobación y aceptación del espacio disponible para realizar el cambio de carril.

El modelado de tales procesos es bastante complicado. Por un lado el proceso de cambio de carril está oculto por naturaleza y por otro es que el tiempo empleado para realizar la maniobra es difícil de calcular. También hay que decir que se trata de un proceso continuo en el tiempo.

Para simplificar el modelado, el proceso se discretiza, asumiendo que los conductores toman las decisiones de cambio de carril en determinados instantes de tiempo, sin tener en cuenta las decisiones tomadas anteriormente. Veamos a continuación algunos de dichos modelos de cambio de carril.

### **2.10.2.- Modelo de Cambio de Carril de Gipps.**

El primer modelo de cambio de carril fue desarrollado por Gipps (1986). Presentó un modelo práctico para ser empleado en los simuladores de tráfico microscópicos. Está enfocado a cubrir diferentes situaciones en el proceso de conducción por el viario, donde las señales de tráfico, obstáculos y vehículos pesados influyen en la decisión del conductor. El diseño del modelo está concebido para ser empleado conjuntamente con el modelo de seguimiento de vehículos del mismo autor, que considera una aceleración de frenada que permite calcular la velocidad de seguridad con respecto al vehículo precedente. A continuación se muestran los factores que pueden influir sobre los conductores en el instante de realizar un cambio de carril:

- Seguridad en el cambio de carril: si existe peligro de colisión no se realiza la maniobra.
- Existencias de obstáculos permanentes: cuando el conductor sabe de la existencia de un problema de forma continuada en un carril, tratará de evitarlo.
- Existencia de carril reservado: cuando un carril está libre tiende a ser ocupado por cualquier vehículo aunque lo tenga prohibido, como ocurre por ejemplo con los carriles de solo bus y taxis.
- Realización de giros: deseo del conductor de realizar un giro al finalizar el tramo por el que se desplaza.
- La presencia de vehículos pesados: siempre se trata de evitar conducir detrás de dichos vehículos ya que su aceleración es muy baja.
- Velocidad: el conductor siempre se intenta colocar en aquel carril cuya velocidad sea mayor.

Gipps propone que el comportamiento de los conductores en el proceso de cambio de carril sigue un modelo en el que los conductores buscan la mejor situación (carril) para realizar un giro. Mientras el giro se encuentre alejado no existe ningún tipo de efecto o influencia y el conductor se centra en mantener la velocidad deseada. A partir de cierta distancia el conductor comienza a ignorar las oportunidades de mejorar la velocidad y comienza a estudiar los posibles cambios de carril para la realización del giro. Los principales puntos del modelo de Gipps son:

- Selección de carril.
- Admisibilidad del proceso de cambio de carril.
- Comportamiento del conductor en la aproximación del giro.
- Cambio de carril urgente.
- Carriles reservados.
- Invasión de vehículos en carriles reservados.
- Salida de vehículos de los carriles reservados.
- Comportamiento del conductor a media distancia.
- Ventajas de carril actual y carril destino.
- Presencia de vehículos pesados.
- El efecto del vehículo precedente.
- Seguridad.
- Cambio de carril destino.

### **2.10.3.- Modelo de Cambio de Carril de Yang y Koutsopoulos.**

El modelo de cambio de carril desarrollado por Yang y Koutsopoulos e implementado en el simulador MITSIM, se basa en el modelo de cambio de carril de Gipps y está estructurado en tres pasos:

- Comprobación de necesidad y tipo de cambio de carril a realizar.
- Selección del carril deseado.
- Realizar el cambio de carril si el espacio disponible es aceptable.

MITSIM clasifica los cambios de carril obligatorio (MLC) y por mejora (DLC). Los obligatorios se producen cuando el conductor necesita cambiar de carril por:

- Necesidad de cambio hacia otro carril para poder llegar a su destino.
- Cambio de carril apropiado antes de realizar un giro en una intersección.
- Cambio de carril por incorporación desde carriles de aceleración.
- Cambio de carril para la incorporación a carriles de deceleración.
- Cambios provocados por bloqueo de carril.
- Evitar la entrada a carriles restringidos.
- Responder a mensajes de señales.

Los modelos de cambio de carril por mejora están basados en las condiciones de tráfico en el carril actual y carril destino. Considera que los conductores realizan el cambio para mantener o mejorar las condiciones de conducción. Un vehículo lleva a cabo un cambio de carril para obtener:

- Incremento de la velocidad.
- Adelantamiento de un vehículo lento o pesado.
- Evitar carriles conectados a salidas de la calzada.

Entre las características del conductor que pueden afectar a dicho cambio se encuentran:

- Agresividad del conductor.
- Velocidad deseada en flujo libre.
- Aceleración y frenada máximas habituales.
- Impaciencia del conductor.

Los estímulos externos pueden proceder del mismo carril o bien de carriles adyacentes. Entre los estímulos externos consideramos dos grupos:

1.- Estímulos procedentes del mismo carril.

- Distancia relativa entre el vehículo y el vehículo predecesor.
- Velocidad relativa entre el vehículo y el predecesor.
- Cambio de carril del vehículo predecesor.
- El vehículo predecesor realiza un cambio de carril a izquierda o derecha.
- Existencia de vehículos pesados.
- Vehículos estacionados.
- Agresividad del conductor seguidor.

2.- Estímulos procedentes de carriles adyacentes.

- Distancia relativa entre el vehículo y el candidato a ser su predecesor en el nuevo carril.
- Velocidad relativa entre el vehículo y el candidato a ser su sucesor en el nuevo carril.
- El vehículo candidato a ser nuevo predecesor está realizando un cambio de carril.
- El vehículo candidato a ser el nuevo predecesor es un vehículo pesado o está estacionado.

Los pasos que sigue el modelo de Yang y Koutsopoulos son los siguientes:

- Se comienza seleccionando el tipo de cambio de carril que intentará hacerse, es decir MLC o DLC.
- Si seleccionamos MLC tenemos la posibilidad de escoger carril derecho o izquierdo.
  - La siguiente tarea es comprobar si existe espacio suficiente para realizar la maniobra de cambio de carril. En caso afirmativo el vehículo se desplaza al nuevo carril. Si la distancia no es la suficiente, el vehículo desiste del proceso para volver a intentarlo con posterioridad.
- En caso de escoger DLC, tenemos que decidir si las condiciones de tráfico son satisfactorias o no. Hablamos de condiciones satisfactorias cuando los requerimientos exigidos por el conductor se satisfacen. Si las condiciones no son satisfactorias, el conductor compara las condiciones del cambio de carril actual con los carriles adyacentes, los factores a tener en cuenta pueden ser el estado del tráfico y pavimento en los carriles adyacentes, velocidad deseada, densidad de tráfico en los diferentes carriles, velocidades relativas con respecto a vehículos seguidores y predecesores en otros carriles, etc. Cuando las condiciones de los carriles adyacentes

son mejores a las actuales se procede a seleccionar el cambio de carril para posteriormente comprobar si la distancia es segura para llevarlo a cabo. Dicha comprobación depende de la velocidad actual del vehículo y de los futuros vehículos precedente y sucesor, distancia restante a la finalización del tramo, retraso, etc. En caso afirmativo se procede al cambio de carril.

#### **2.10.4.- Selección de Carril Deseado.**

En el proceso de cambio de carril el conductor debe determinar el conjunto de carriles admisibles. Un carril es admisible cuando cumple una serie de criterios como regulación favorable del carril al que se desea ir, acceso permitido, conexión del carril con los tramos adecuados según destino, estado de las señales asociadas al carril, condiciones de tráfico, velocidad deseada por el conductor y señalización vertical (por ejemplo velocidades máximas y mínimas). En caso de selección de carril para modelos de cambio discrecional un carril es admisible cuando mejora o iguala las condiciones de carril actual.

#### **2.10.5.- Modelos de Intervalos de Aceptación (Espacio disponible para realizar el cambio de carril).**

Una vez seleccionado el carril, se debe examinar la distancia disponible para poder realizar la maniobra. El proceso de comprobación se basa en la medición de la distancia existente entre el vehículo que quiere cambiar de carril y los futuros vehículos sucesor y predecesor.

Los parámetros que influyen en la decisión de cambio de carril son la distancia de separación entre los vehículos  $n$  y  $n-1$  (llamada intervalo trasero) además de la existente entre el  $n$  y  $n+1$  (intervalo delantero). También es importante la velocidad de los vehículos. Otros parámetros de menor consideración son la distancia y velocidad del vehículo con respecto a otros vehículos que circulan por el mismo carril.

La expresión que determina si un cambio de carril es seguro, es decir si la distancia del vehículo al vehículo predecesor y al sucesor del nuevo carril es adecuada, queda determinada por:

$$g_n^i(t) = g_{n,\text{inf}}^i + \varepsilon_n^i \quad i = \{d, t\}$$

$g_{n,\text{inf}}^i(t)$  : cota inferior de la distancia que el conductor  $n$ , en el instante  $t$ , considera como aceptable para realizar el cambio de carril.

$g_n^i(t)$  : intervalo medio.

$\varepsilon_n^i$  : término aleatorio que varía para cada conductor.

Los primeros modelos de aceptación de intervalo fueron desarrollados en la década de los 60 y se basan en la presunción de existencia de un intervalo crítico, es decir una distancia de mínima seguridad. Los primeros trabajos de Herman y Weiss (1961) establecieron que dicho intervalo seguía una distribución exponencial. Otros autores como Drew (1967) propuso una distribución logarítmica y Miller (1972) una normal.

Los primeros que incorporan los intentos fallidos de cambio de carril son Mahmassani y Sheffi (1981), que asumieron que el intervalo crítico seguía una distribución normal. La función de intervalo desarrollada dependía de un conjunto de variables explicativas que permitía hacer depender el intervalo crítico de los intentos fallidos de cambio de carril.

En 1983, Kita emplea un modelo para estimar el intervalo aceptado por los conductores para el cambio de carril, aplicando el modelo a carriles de incorporación en autopistas.

En el modelo general de cambio de carril obligatorio (MLC), el intervalo aceptable para realizar la maniobra de cambio de carril disminuye a medida que nos acercamos al final del tramo. El modelo de aceptación de intervalo tiene la forma siguiente:

$$g_n^i(t) = \varepsilon_n^i + \begin{cases} g_{n,\text{sup}}^i & x_n \geq x_{\text{max}} \\ g_{n,\text{inf}}^i + (g_{n,\text{sup}}^i - g_{n,\text{inf}}^i) \frac{(x_n - x_{\text{min}})}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}} & x_{\text{min}} < x_n < x_{\text{max}} \\ g_{n,\text{inf}}^i & x_n \leq x_{\text{min}} \end{cases}$$

$i$  : índice que representa si el parámetro es para el intervalo delantero o trasero.

$g_n^i$  : intervalo mínimo que el conductor  $n$  considera aceptable para realizar el cambio de carril.

$g_{n,\text{inf}}^i$  y  $g_{n,\text{sup}}^i$  : cotas inferiores y superiores.

$x_n$  : posición actual del vehículo.

$x_{\text{min}}$  y  $x_{\text{max}}$  : distancias que definen el rango de variación del intervalo crítico desde  $g_{n,\text{inf}}^i$  hasta  $g_{n,\text{sup}}^i$ .

$\varepsilon_n^i$  : término de error.

Yang (1996) propone un modelo, implementado en MITSIM que a diferencia del anterior tiene en consideración las velocidades relativas de los futuros vehículos, precedente y seguidor.

Para cambio de carril por mejora propone:

$$g_n^d = \max(g_{n,\text{inf}}^d, g_{n,\text{inf}}^d + \beta_1 v_n + \beta_2 (v_n - v_{n+1}) + \varepsilon_n^d)$$

$$g_n^t = \max(g_{n,\text{inf}}^t, g_{n,\text{inf}}^t + \beta_1 v_{n-1} + \beta_2 (v_{n-1} - v_n) + \varepsilon_n^t)$$

Para el cambio de carril obligatorio la expresión es :

$$g_n^d = \max(g_{n,\text{inf}}^d, g_{n,\text{inf}}^d + [\beta_1 v_n + \beta_2 (v_n - v_{n+1})](1 - e^{-\lambda x_n^2}) + \varepsilon_n^d)$$

$$g_n^t = \max(g_{n,\text{inf}}^t, g_{n,\text{inf}}^t + [\beta_1 v_{n-1} + \beta_2 (v_{n-1} - v_n)](1 - e^{-\lambda x_n^2}) + \varepsilon_n^t)$$

$\beta_1$  y  $\beta_2$  : parámetros del modelo.

El modelo desarrollado por Yang y Koutsopoulos (1996) no se puede aplicar al caso de modelos de fusión de carriles y modelos de cortesía donde el conductor cede el paso al vehículo que desea incorporarse al carril.

### **2.10.6.- Modelo de Fusión Obligatorio. (Merging model)**

Los modelos de fusión obligatorios se utilizan cuando el conductor no ha encontrado tras cierto número de intentos realizados, el espacio necesario para realizar la maniobra de cambio de carril obligatorio. Este efecto suele producirse en momentos en los que la densidad de tráfico es elevada, con condiciones de desplazamiento muy pequeñas y por tanto no adecuadas para el cambio de carril.

Dichos modelos tratan de facilitar la maniobra mediante la creación del espacio suficiente entre los vehículos de tal forma que se permita la incorporación de un nuevo vehículo al carril.

El procedimiento se encarga de actualizar la aceleración y velocidad de los vehículos del carril adyacente (futuro precedente y predecesor) para que la distancia entre ellos aumente. Algunos modelos comprueban el espacio y actúan sobre la aceleración del futuro vehículo seguidor, otros provocan la actualización de la aceleración de los vehículos situados en el carril adyacente y el propio carril.

Kazi (1999) propone el siguiente modelo: sea  $S_n(t)$  el estado del vehículo n en el instante t. Usando un modelo logit, se define la probabilidad de realizar un cambio de carril con el modelo de fusión obligatorio condicionado a un conjunto de variables aleatorias.

Las variables que definen las características del modelo incluyen:

- Velocidad relativa del primer conductor, sólo cuando es baja. Cuando esto ocurre, el conductor tiende a disminuir la velocidad, ajustándola a la del primero.
- Velocidad relativa con respecto al conductor seguidor, sólo cuando es elevada. En este caso se tiende a acelerar el vehículo e intentar el cambio de carril siempre que la velocidad del vehículo predecesor no sea inferior al vehículo seguidor.

- A medida que el conductor se aproxima a un punto donde el cambio de carril deseado debe ser completo, aumenta la ansiedad y la necesidad de cambiar de carril, lo que se traduce en un aumento de la probabilidad de realizar la maniobra.
- El retraso, tiempo que el conductor debe esperar hasta cambiar de carril. Esto aumenta la agresividad o necesidad de hacer la maniobra.
- La separación total, medida como la distancia entre vehículos, influye en la posibilidad de realizar el cambio de carril.

En cada instante se asume que el conductor :

- Evalúa las condiciones de tráfico en el carril destino para decidir si se intenta un cambio de carril forzado.
- El conductor intenta comunicarse con el conductor seguidor para saber si este le cederá el paso o por el contrario aumentará su velocidad impidiendo el cambio de carril. Si el conductor seguidor cede el paso , la maniobra se finaliza con éxito y el proceso termina.

### **2.10.7.- Proceso de Cambio de Aceleración durante un Cambio Obligado de Carril.**

Frecuentemente los conductores tienen que ajustar su aceleración para la realización de maniobras de cambio de carril. Se consideran los siguientes casos :

- Cambio de carril sin cambio de aceleración.
- El vehículo necesita acelerar. El proceso de aceleración para la maniobra de cambio de carril puede deberse a dos situaciones :
  - La separación trasera de seguridad no cumple los mínimos requerimientos y hay suficiente distancia entre el nuevo vehículo predecesor y el vehículo sucesor en el carril destino de la maniobra.
  - La separación trasera y delantera no cumple los requerimientos mínimos pero hay espacio suficiente entre el nuevo vehículo predecesor y el vehículo sucesor en el carril destino de la maniobra.
- El vehículo necesita frenar. El proceso de frenada puede deberse a dos situaciones :
  - La separación trasera no cumple los mínimos requerimientos y hay suficiente distancia entre el nuevo vehículo sucesor y el vehículo en el carril destino de la maniobra.
  - La separación trasera y delantera no cumple los requerimientos mínimos pero hay espacio suficiente entre el nuevo vehículo predecesor y el vehículo sucesor en el carril destino de la maniobra.
- Los vehículos en el carril destino cambian su velocidad.
- Los vehículos realizan una parada total.

## **2.11.- Modelos de Simulación Mesoscópicos.**

### **2.11.1.- Introducción.**

Los modelos de simulación mesoscópicos se utilizan para predecir las condiciones del tráfico en los sistemas de gestión (TMS) así como conjuntamente con

---

los modelos de asignación para la obtención de rutas. Los modelos de simulación mesoscópicos son muy parecidos a los modelos de simulación microscópica, con la única salvedad de que agrupan los vehículos en pelotones.

### **2.11.2.- Características de los Simuladores Mesoscópicos.**

- Alcanzan un nivel de detalle superior al de los procedimientos de asignación, pero no tan elevado como los simuladores microscópicos.
- Se emplean para predecir las condiciones del tráfico en el viario y obtener información necesaria para conocer la selección de rutas.
- Se caracterizan por estudiar los vehículos en grupos a los que se denominan pelotones o célula. El comportamiento de todo el pelotón se condiciona a las actuaciones del primer vehículo.

#### **2.11.2.1.- Representación del viario.**

El viario se representa por nodos (intersecciones) y tramos (calles), pudiéndose incorporar más elementos tales como:

- Segmentos: descrito por MESOTS. Cada uno de ellos se caracteriza por la velocidad máxima, geometría, número de carriles y función de retraso del segmento.
- Señales semafóricas: representan los semáforos del viario que regulan la circulación e influyen sobre el comportamiento del pelotón.
- Carriles: algunos simuladores diferencian el comportamiento en cada carril y otros agrupan el comportamiento por tramos.
- Giros: describen las conexiones entre tramos a través de una intersección. Se caracterizan por tener un porcentaje que indica el número de vehículos sobre el total que se desplaza en el tramo y toma dicho giro.
- Movimientos: se trata del desplazamiento por el interior de las intersecciones. Un movimiento es una desagregación del concepto de giro, es decir un giro lo componen una o varias secuencias de movimientos, cada una de ellas conecta dos carriles de tramos diferentes conformando el giro.
- Pelotones: entidad que representa una agrupación de vehículos que circula por el viario.

#### **2.11.2.2.- Agrupación y división de vehículos.**

El proceso se encarga de comprobar que las condiciones de dos pelotones consecutivos son tan similares que pueden fusionarse en uno sólo. Por otra parte, la división de vehículos debe realizarse cuando en el interior del pelotón existan grandes diferencias en el estado y comportamiento de los vehículos.

#### **2.11.3.- Modelo de Aceleración.**

El modelo de aceleración que se emplea en los simuladores mesoscópicos es muy parecido al utilizado en los microscópicos, con la diferencia que los vehículos se agrupan en pelotones o células y es necesario determinar la aceleración del primer y

último vehículo de cada pelotón. Al igual que en el simulador microscópico se establecen diferentes regímenes, en cada uno de los cuales se utiliza una aceleración diferente.

### **2.11.3.1.- Modelo de aceleración de MESOSTS.**

Dicho modelo ha sido desarrollado por Yang (1966) y aplicado en el simulador MESOSTS. Se basa en dos modelos de desplazamiento, modelo de velocidad-densidad y modelo de seguimiento de células.

El modelo velocidad-densidad se utiliza para calcular la velocidad del último vehículo de la célula, mientras que el modelo de seguimiento de células se emplea para obtener la velocidad del primer vehículo.

#### **2.11.3.1.1.- Modelo de seguimiento de células.**

Las células se encuentran en dos tipos de regímenes, flujo libre e influenciado por un pelotón precedente, Un pelotón está en flujo libre cuando la distancia de separación con el último vehículo del pelotón precedente es superior a la distancia de influencia. La aceleración del primer vehículo del pelotón queda determinada por la siguiente expresión :

$$v_{1,n} = \begin{cases} v_{des} & x_{m,n+1}(t) - x_{1,n}(t) \geq D_n^{inf} \\ \lambda_j V_{max} + (1 - \lambda_j)v_{m,n+1}(t) & x_{m,n+1}(t) - x_{1,n}(t) < D_n^{inf} \end{cases}$$

$$\lambda_j \frac{x_{m,n+1}(t) - x_{1,n}(t)}{D_n^{inf}}$$

$v_{1,n}(t)$  : velocidad del primer vehículo de la célula.

$x_{m,n+1}(t)$  : posición de la cola del pelotón precedente en el instante t.

$x_{1,n}(t)$  : posición del primer vehículo del pelotón en estudio en el instante t.

$D_n^{inf}$  : distancia de influencia del pelotón en estudio. Para el simulador MESOSTS es una distancia fija y prefijada.

$v_{m,n+1}(t)$  : velocidad del último vehículo de la célula precedente.

$V_{max}$  : velocidad máxima permitida en el tramo.

$\lambda_j$  : factor empleado para adecuar la velocidad del vehículo evitando la colisión con el pelotón delantero.

#### **2.11.3.1.2.- Modelo de seguimiento densidad-velocidad.**

La velocidad de la cola del pelotón viene determinada mediante la expresión :

$$v_{m,n}(t) = v_n^{min} + (v_n^{des} - v_n^{min}) \left(1 - \left[\frac{k_i}{k_j}\right]^\alpha\right)^\beta -$$

$v_{m,n}(t)$  : velocidad del vehículo m (cola del pelotón) del pelotón n en el instante t.

$k_i$  : densidad de tráfico en el pelotón.

$k_j$  : densidad para saturación del tramo.

$\alpha, \beta$  : parámetros del modelo.

$V_{max}$  : velocidad máxima del segmento.

$V_{min}$  : velocidad mínima del segmento.

Los valores  $\alpha, \beta$  y  $k_j$  determinan la forma de la función velocidad-densidad. Los factores de densidad determinan la velocidad de la cola del pelotón. Cuando la densidad del pelotón es elevada la velocidad de la cola es muy próxima a la velocidad mínima.

### **2.11.3.2.- Modelo de aceleración de DINAMIT.**

El siguiente modelo de aceleración fue desarrollado por Ben-Akiva (1998) y aplicado al simulador DINAMIT. El modelo de aceleración considera que la velocidad de los vehículos varía mediante un función lineal dependiente de la posición del vehículo sobre un segmento del tramo. El modelo de simulación emplea tres tipos de elementos, nodos, tramos y segmentos. Los segmentos son subdivisiones de los tramos, tienen restricciones de capacidad al final y se dividen en dos secciones, sección de desplazamiento y de parada. La sección de desplazamiento es la zona del tramo en la que los vehículos se desplazan a cierta velocidad. La sección de parada es la zona donde los vehículos se detienen formando colas. La longitud de ambas secciones puede variar dependiendo del proceso de simulación.

La expresión de velocidad tiene dos formas dependiendo de la proximidad al final del segmento. La velocidad al comienzo del segmento es función de la densidad de tráfico y queda definida por:

$$v_{1,n}(t) = \max \left\{ v_{min}, v_{1,n}^{des} \left[ 1 - \frac{k_j}{k} \right]^\alpha \right\}$$

Al final del segmento la velocidad depende de la velocidad al principio del siguiente tramo. Los segmentos tienen dos zonas, una de aceleración positiva y otra de aceleración negativa. Antes de cada zona la velocidad es constante e igual a  $v_{1,n}(t)$ . Dentro de una zona de aceleración bien positiva o negativa la velocidad del vehículo varía linealmente con respecto a la posición.

### **2.11.4.- Modelo de Fusión y División.**

La fusión y división de pelotones es un aspecto muy importante en el desarrollo del simulador mesoscópico. Los pelotones se caracterizan por aumentar su tamaño en los procedimientos de arranque, reduciendo dicho tamaño cuando disminuye la velocidad o bien queda totalmente detenido (compresión de pelotón).

El desplazamiento de la longitud de un pelotón no es indefinido. Se recurre a definir una densidad mínima que conduce a la división del pelotón en dos unidades independientes.

Si la densidad del pelotón es menor que la densidad mínima obtenida por formulación matemática, se procede a la división del pelotón en dos unidades. El punto de ruptura se obtiene aleatoriamente seleccionando un vehículo y creando un nuevo pelotón.

La fusión de dos pelotones se realiza cuando están situados en el mismo carril y se encuentran muy próximos. La distancia de unión es un valor tal que la nueva densidad del pelotón es superior a la densidad mínima.