

# MODELO DE CAMBIO DE CARRIL PARA UN SIMULADOR MICROSCÓPICO DE TRÁFICO URBANO

Jesús Racero Moreno  
[jrm@esi.us.es](mailto:jrm@esi.us.es)

José David Canca Ortiz  
[dco@esi.us.es](mailto:dco@esi.us.es)

José Ramón Sánchez Gracia

Fernando Jiménez Canelada  
[canelada@esi.us.es](mailto:canelada@esi.us.es)

Jesús Muñuzuri Sanz  
[munuzuri@esi.us.es](mailto:munuzuri@esi.us.es)

Dpto. de Organización y Gestión de Empresas. Escuela Superior de Ingenieros.  
Universidad de Sevilla

## Resumen

*Este trabajo presenta parte de un modelo de simulación microscópica desarrollado para el modelado de redes urbanas reguladas mediante sistemas de control de tráfico. El simulador microscópico contempla el viario con un alto grado de detalle, simulando el comportamiento de cada vehículo mediante nuevos modelos de aceleración y cambio de carril. Así mismo incorpora un novedoso modelo de aparcamiento que permite estudiar el impacto de los vehículos y su influencia en el viario en cuestión de aparcamientos. El modelo de selección de rutas está basado en el estudio de los porcentajes de vehículos que realizan un giro y que determina indirectamente los tipos de cambio de carril que se pueden realizar. El simulador ha sido diseñado mediante metodología orientada a objetos (UML, lenguaje de modelado unificado) y la implementación ha sido realizada en C++. El artículo se centra en la estructura del modelo de cambio de carril desarrollado en el simulador.*

## 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, aplicadas en un instante determinado. La mayoría de los simuladores mantienen una lista de vehículos por cada uno de los carriles. Estos se desplazan acorde a modelos de seguimiento de vehículos, cambio de carril y modelos de respuesta a eventos. Los modelos de seguimiento de vehículos calculan la aceleración o deceleración de un vehículo dependiendo de su relación con el vehículo precedente, los modelos de cambio de carril representan las decisiones instantáneas de selección de carril; y los modelos de respuesta a eventos obtienen la respuesta de los conductores a las señales de tráfico, incidentes, etc

Cuando el conductor toma la decisión de realizar un cambio de carril, sigue las siguientes 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 extremadamente complicado. Primero, el proceso de cambio de carril está oculto por naturaleza, todo el proceso es observado conjuntamente desde que se realiza la decisión de cambio de carril hasta la comprobación del espacio necesario para realizar el cambio. Y segundo, el tiempo empleado para decidir si se realiza la maniobra de cambio de carril no puede ser calculado. Por último, la decisión de cambio carril es continua 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, es decir el proceso no considera las decisiones de cambios de carril consideradas con anterioridad.

## 2.- Diseño de un modelo de cambio de carril.

Los modelos de cambio de carril se basan en las decisiones que toma cada conductor en cada instante de tiempo acerca de si es conveniente mantener el carril actual o cambiar hacia carriles que le permitan mejorar su velocidad, evitar obstáculos o situarse correctamente para girar al final del tramo. El comportamiento de cada conductor depende de la distancia hasta el inicio del giro, si se encuentra alejado del giro, entonces se concentra en mantener la velocidad deseada, ya sea en el carril actual o en otro cualquiera; si está próximo a una posición crítica (señal de final de carril o similar), entonces su objetivo principal es acercarse a los carriles que le permitan girar sin importarle la velocidad.

### 2.1.- Notación.

El siguiente gráfico muestra un ejemplo donde un vehículo (n) desea realizar una maniobra de cambio de carril (movimiento al carril adyacente). Por el carril adyacente se desplazan dos vehículos separados cierta distancia (vehículo n-1 y vehículo n+1).

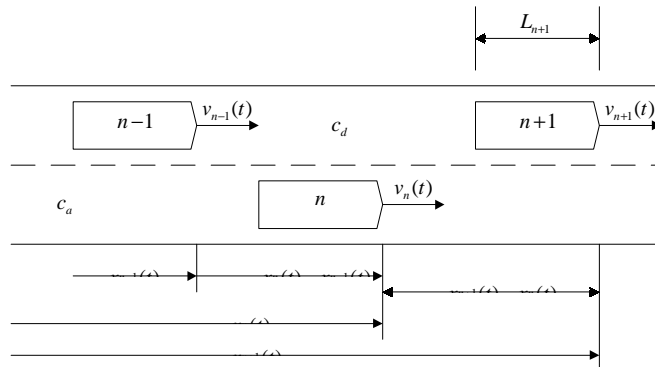


Figura 2.1.1 Notación cambio de carril.

Donde,

$c_a, c_d$  : Carril y carril destino del vehículo (Carril actual, Carril destino).

$a_{n,max}^-, a_{n-1,max}^-, a_{n+1,max}^-$  : Aceleración de frenada máxima que puede aplicar el vehículo n, n-1 y n+1.

$a_n(t), a_{n-1}(t), a_{n+1}(t)$  : Aceleración del vehículo n, n-1 y n+1 en el instante t.

$v_n(t), v_{n+1}(t), v_{n-1}(t)$  : Velocidad del vehículo n, n+1 y n-1 en el instante t.

$x_n(t), x_{n+1}(t), x_{n-1}(t)$  : Posición del vehículo n, n+1 y n-1 en el instante t.

$n_c$  : Número de carriles en el tramo.

$D_n^{seg}(t), D_{n-1}^{seg}(t), D_n^{inf}(t)$  : Distancia de seguridad del vehículo n, n-1 y n en el instante t.

$L_n, L_{n+1}$  : Longitud del vehículo n y n+1.

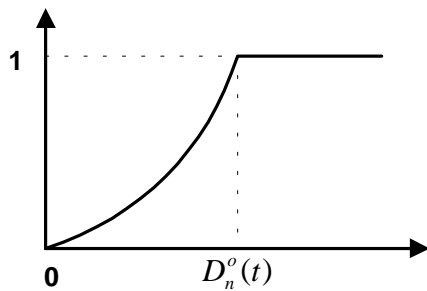
## 2.2- Tipos de cambio de carril.

El modelo, diferencia dos tipos de cambio de carril, obligatorio y por mejora. El cambio obligatorio de carril se utiliza para situarse en el carril apropiado como consecuencia de la realización de una maniobra (aparcamiento, giro, etc). El cambio de carril por mejora es utilizado por el conductor para alcanzar la velocidad deseada.

El procedimiento de cambio de carril comienza seleccionando el tipo de cambio de carril que se realiza, el método de selección necesita conocer la distancia a partir de la cual no se realizarán cambios de carril por mejora. La distancia de cambio de carril obligatorio queda definida mediante la expresión:

$$D_n^o(t) = D_{n,min}^o + D_n^{inf}(t) \times \left[ 1 + \frac{|c_d - c_a|}{n} \right]^\lambda$$

donde,  $c_d$  indica el carril destino del vehículo,  $c_a$  el carril donde se encuentra actualmente,  $n$  el número de carriles en el tramo,  $D_{n,min}^o$  la distancia mínima para realizar un cambio de carril obligatorio,  $D_n^{inf}(t)$  la distancia de influencia del vehículo,  $\lambda$  es un parámetro para la calibración del modelo que se emplea para clasificar el tipo de conductor y  $n$  el número de carriles de que consta el tramo. Conocida la distancia a partir de la cual solo se realizará cambio de carril obligatorio procedemos a describir la función empleada para seleccionar un tipo u otro de cambio de carril. La función especifica la probabilidad de seleccionar el cambio de carril obligatorio antes de alcanzar la distancia mínima,  $D_n^o(t)$ . La expresión y gráfica que caracteriza el comportamiento del conductor en la selección del cambio de carril obligatorio es:



$$f(x) = \left( \frac{1 - e^{-x}}{1 - e^{-D_n^o(t)}} \right)^\gamma$$

Figura 2.2.1. Gráfica de probabilidad de seleccionar un cambio de carril obligatorio. El parámetro  $\gamma$  es empleado para diferenciar los diferentes tipos de conductor.

### 2.3.- Selección del carril.

La selección del carril destino es una de las tareas más importantes en el modelo de cambio de carril. Los conductores seleccionan el carril dependiendo de varios factores como, tipo de cambio de carril, giro que desea realizar al final del tramo, velocidad deseada por el conductor, etc.

El tipo de cambio de carril es un factor muy importante. Cuando la distancia del vehículo hasta el inicio de un giro o maniobra de aparcamiento es inferior o igual a la distancia de cambio de carril obligatorio, el conductor debe desplazarse al carril necesario, denominado carril destino, para realizar la maniobra. En el caso que el vehículo necesite realizar mas de un cambio de carril, estos deben ser realizados uno a uno, el vehículo se situará en aquel carril que le permita acercarse al carril destino.

El cambio de carril por mejora se selecciona cuando la velocidad del conductor es inferior a la velocidad deseada. El carril que el conductor selecciona es aquel que le proporcione la mayor velocidad posible. El conductor comprueba la velocidad final que el vehículo alcanzaría si cambiara al nuevo carril y lo seleccionaría mediante los siguientes criterios:

La probabilidad de realizar un cambio de carril aumentará cuando la velocidad futura en el nuevo carril sea superior a la velocidad actual.

La probabilidad disminuye en la medida que la mejora de la aceleración suponga la realización de varias maniobras de cambio de carril.

### 2.4.- Modelo de aceptación de intervalo.

Una vez seleccionado el tipo de cambio de carril se procede a comprobar que el espacio existente es suficiente para que se realice el cambio con seguridad evitando colisiones. Hay que destacar que cuando el vehículo está situado en un carril no apropiado para la realización de una maniobra (aparcamiento, giro u obstáculo), la necesidad de realizar un cambio de carril obligatorio incide en el comportamiento del conductor, aceptando

espacios (intervalos) más pequeños en la medida que se aproxima al comienzo de la realización de una maniobra. Por otra parte para cambio de carril por mejora el conductor tenderá a buscar espacios grandes que eviten la colisión.

Distancia mínima de seguridad (Intervalo crítico). La distancia mínima de seguridad es el espacio mínimo que debe existir entre dos vehículos para evitar la colisión entre ellos. Un vehículo no acometerá un cambio de carril si la distancia de seguridad entre el y sus futuros vehículos predecesor y sucesor es inferior a la distancia de seguridad.

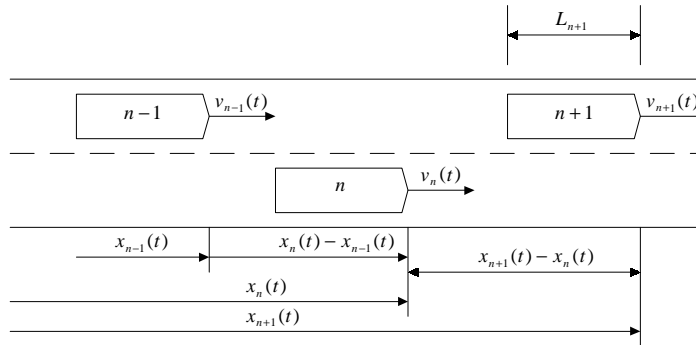


Figura 2.4.1 Modelo de aceptación de intervalo. Representación.

Las expresiones son:

$$x_{n+1}(t) - x_n(t) - L_{n+1} \geq D_n^{seg}(t); \quad x_n(t) - x_{n-1}(t) - L_n \geq D_{n-1}^{seg}(t)$$

Aunque la distancia permita la realización del cambio de carril, es el conductor quien considerará si la distancia es la necesaria para realizar la maniobra. Así mismo la necesidad de realizar un cambio de carril incide en la aceptación de espacios mas reducidos a medida que se aproxima al inicio de una maniobra. El modelo de aceptación puede dividirse en dos dependiendo del tipo de cambio de carril que se desea realizar.

Si el cambio de carril es obligatorio la función de aceptación de gap tiene la siguiente forma:

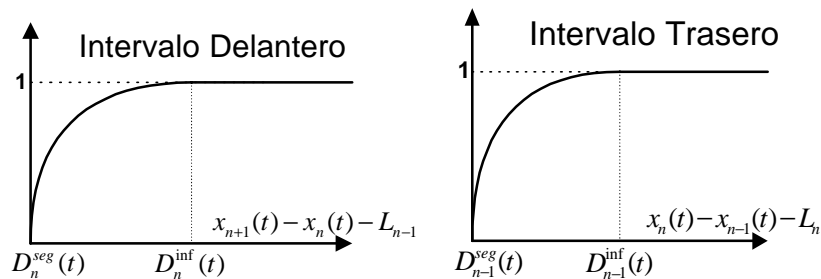


Figura 2.4.2 Modelo de aceptación de intervalo. Representación.

donde,  $D_{n-1}^{inf}(t)$  y  $D_n^{inf}(t)$ , corresponde a las distancias de influencia del vehículo \$n\$ y \$n-1\$ en el instante \$t\$.

La función representa el comportamiento de un conductor el cual necesita realizar un cambio de carril obligatorio aceptando menores distancias. La expresión que representa la función de aceptación es:

$$f^d(x) = \frac{1 - e^{-z_1}}{1 - e^{-z_2}}; \quad z_1 = D_n^{\text{inf}}(t) - (x_{n+1}(t) - x_n(t) - L_{n+1}) \text{ y } z_2 = D_n^{\text{inf}}(t) - D_n^{\text{seg}}(t)$$

$$f^t(x) = \frac{1 - e^{-z_1}}{1 - e^{-z_2}}; \quad z_1 = D_{n-1}^{\text{inf}}(t) - (x_n(t) - x_{n-1}(t) - L_n) \text{ y } z_2 = D_{n-1}^{\text{inf}}(t) - D_{n-1}^{\text{seg}}(t)$$

Esta expresión proporciona una función como las representadas en las gráficas anteriores, pero no refleja el comportamiento del conductor que disminuye la distancia de aceptación a medida que se aproxima al final. Para poder expresar un comportamiento más real se modifica la expresión quedando:

$$f^d(x) = \left( \frac{1 - e^{-z_1}}{1 - e^{-z_2}} \right)^y; \quad z_1 = D_n^{\text{inf}}(t) - (x_{n+1}(t) - x_n(t) - L_{n+1}), \quad z_2 = D_n^{\text{inf}}(t) - D_n^{\text{seg}}(t) \text{ e}$$

$$y = \left( \frac{D_n^{\text{inf}}(t) - (x_{n+1}(t) - x_n(t) - L_{n+1})}{D_n^{\text{inf}}(t) - D_n^{\text{seg}}(t)} \right)^y$$

$$f^t(x) = \left( \frac{1 - e^{-z_1}}{1 - e^{-z_2}} \right)^y; \quad z_1 = D_{n-1}^{\text{inf}}(t) - (x_n(t) - x_{n-1}(t) - L_n), \quad z_2 = D_{n-1}^{\text{inf}}(t) - D_{n-1}^{\text{seg}}(t) \text{ e}$$

$$y = \left( \frac{D_{n-1}^{\text{inf}}(t) - (x_n(t) - x_{n-1}(t) - L_n)}{D_{n-1}^{\text{inf}}(t) - D_{n-1}^{\text{seg}}(t)} \right)^y$$

Cuando el cambio de carril es por mejora el modelo debe rechazar con mayor probabilidad las distancias cercanas a la de seguridad buscando distancia próxima a la distancia de influencia. La curva que describe el comportamiento del conductor es:

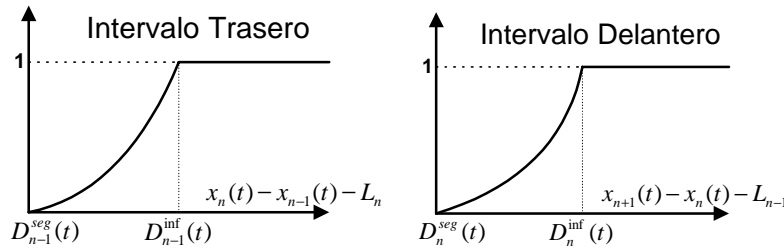


Figura 2.4.3 Modelo de aceptación de intervalo. Representación.

El conductor aceptará distancias superiores con mayor probabilidad. La expresión que determina la función de comportamiento del conductor es:

$$f^d(x) = \left( \frac{1 - e^{-z_1}}{1 - e^{-z_2}} \right)^y; \quad z_1 = (x_{n+1}(t) - x_n(t) - L_{n+1}) - D_n^{\text{seg}}(t), \quad z_2 = D_n^{\text{inf}}(t) - (x_{n+1}(t) - x_n(t) - L_{n+1}) \text{ e}$$

$$y = \left( \frac{D_n^{\text{inf}}(t) - (x_{n+1}(t) - x_n(t) - L_{n+1})}{D_n^{\text{inf}}(t) - D_n^{\text{seg}}(t)} \right)^y$$

$$f^t(x) = \left( \frac{1 - e^{-z_1}}{1 - e^{-z_2}} \right)^y; \quad z_1 = (x_n(t) - x_{n-1}(t) - L_n) - D_{n-1}^{\text{seg}}(t), \quad z_2 = D_{n-1}^{\text{inf}}(t) - (x_n(t) - x_{n-1}(t) - L_n) \text{ e}$$

$$y = \left( \frac{D_{n-1}^{\text{inf}}(t) - (x_n(t) - x_{n-1}(t) - L_n)}{D_{n-1}^{\text{inf}}(t) - D_{n-1}^{\text{seg}}(t)} \right)^y$$

donde el factor  $\gamma$  refleja el comportamiento de diferentes conductores, afectando a la curvatura de la función.

## 2.5.- Estructura de cambio de carril.

El tipo de cambio de carril viene determinado por la posición y velocidad del vehículo en el tramo, empleados para calcular la distancia de seguridad y la distancia de influencia (descrita en los modelos de aceleración), que es utilizada posteriormente para obtener el tipo de cambio de carril que debe realizarse así como la existencia del espacio suficiente para realizarlo. El procedimiento para obtener el tipo de cambio de carril comprueba la posición del vehículo. Si la posición del vehículo supera la distancia de cambio de carril obligatorio se selecciona dicho cambio. En caso contrario se realiza un cambio de carril por mejora. La figura 2.5.1 muestra la estructura del cambio de carril.

El procedimiento de cambio de carril obligatorio se encarga de seleccionar el carril destino. El carril destino se obtiene a partir de los datos de detectores situados en el viario que especifican el porcentaje de vehículos que circula por cada carril al final del tramo. Si la maniobra de cambio de carril supone el desplazamiento sobre varios carriles el procedimiento selecciona el carril adyacente más cercano.

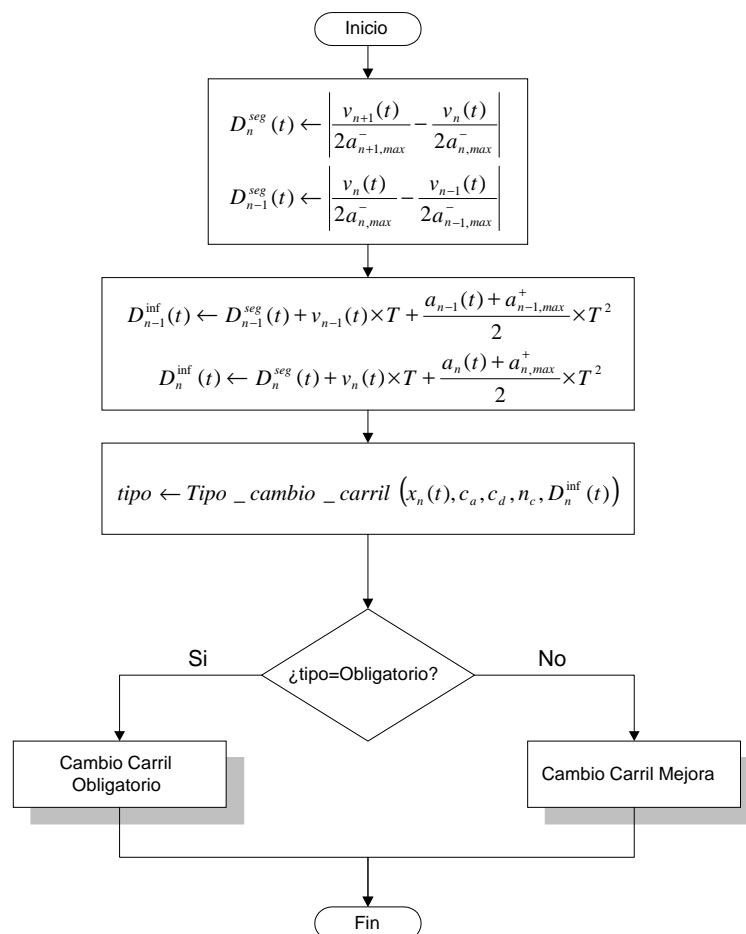


Figura 2.5.1 Procedimiento principal de cambio de carril.

Por último se comprueba si el espacio existente entre vehículos (intervalo de seguridad) es suficiente para realizar el cambio de carril. Para ello se analiza si el espacio entre vehículos es superior a la distancia de seguridad y se obtiene la probabilidad de que el conductor acepte el espacio actual para realizar el cambio. En caso afirmativo se ejecuta la transición.

El modelo de cambio de carril por mejora es empleado para que el vehículo pueda alcanzar la velocidad deseada. El procedimiento consiste en buscar aquel carril en el cual el vehículo pueda alcanzar la mayor velocidad posible y comparar la nueva velocidad con la velocidad actual, procediendo a realizar el cambio de carril si esta velocidad es superior a la velocidad actual. El proceso también estudia el espacio entre vehículos para aceptar o rechazar la maniobra (Aceptación de intervalos).

#### **4.9.- Bibliografía.**

Kazi [1999] Modeling Drivers Acceleration and Lane Changing Behavior. Kazi Iftekhara Ahmed. Ph for Doctor of Science in Transportation System and Decisions Science. MIT. 1999.

Yang[1996]. A Microscopic Traffic Simulator for Evaluation of dynamic Traffic Management systems. Yang Q and Koutsopoulos, H.N. Transportation Research-C4(3), pp 113-129.

Yang[1997]. A simulation laboratory for Evaluation of Dynamic Traffic Management Systems. PhD thesis, Massachusetts Inst. Of Tech., Cambridge, MA.

Barcelo[1996]. The parallelisation of AIMSUM2 microscopic simulator for ITS applications. Barcelo J, Ferrer J, García D, Florian, M. 3<sup>rd</sup> World Congress on ITS, Orlando.

Gipps[1986]. A model for the structure of lane changing decisions. Transportation Research 20B. pp 403-414

Miller, A. J. (1972). Nine estimators of gap acceptance parameters. In G. F. Newell (Ed.), Proceedings, 5th International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation, New York, pp. 215-235. Elsevier.