

UN ENFOQUE CIBERNÉTICO BASADO EN LA LÓGICA DIFUSA PARA EL MODELADO DEL SEGUIMIENTO VEHICULAR

S. González-Rojo^{1,3}, F. Mora-Camino^{1,2}, J.G. Slama⁴ y A. Lopes Pereira⁴

¹*Laboratoire d'Analyse et d'Architecture de Systèmes, Intelligent Systems Group, LAAS du CNRS. 7, Avenue du Colonel Roche 31077 Toulouse - France
(grojo, mora@laas.fr) Fax: (33) 5 61336936*

²*Ecole Nationale de l'Aviation Civile 7, Avenue Edouard Belin 31055 Toulouse*

³*Instituto Tecnológico de Chihuahua, México
Av. Tecnológico 2909, 31310, Chihuahua, Chih. , México.*

⁴*Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ,
Cx. Postal 68512, Rio de Janeiro, Brasil.
Amaranto@PET.COPPE.UFRJ.BR Fax: (021) 290.6626
Jules@rionet.com.br*

RESUMEN

En este trabajo la teoría de los modelos de seguimiento vehicular que está basada en una representación intuitiva del comportamiento de los vehículos es reanalizada a partir de la teoría de la cibernética. Se muestra como el modelo básico se puede sustentar en los conceptos de ésta teoría y se propone un nuevo enfoque basado en la utilización de la lógica difusa para estimar los parámetros principales de este modelo de seguimiento vehicular.

Así, después de la introducción de un nuevo enfoque basado en los conceptos de la cibernética para el modelado del seguimiento vehicular el cual provee una base teórica para el modelo básico de seguimiento vehicular, los principales conceptos de la teoría de la lógica difusa y del modelado difuso son brevemente presentados. Después, un enfoque de modelado difuso, para los principales parámetros del modelo básico de seguimiento vehicular, es introducido. Finalmente, posteriores refinamientos introduciendo estocasticidad son propuestos.

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos de seguimiento vehicular han sido objeto de interés desde el comienzo de la Teoría del Flujo de Tráfico en los años 1950. Muchos modelos han sido propuestos: Gazis, Herman y Potts en 1959[Gazis, Herman, Potts, 59], Herman y Rothery en 1963[Herman, Rothery, 63], Treiterer y Myers en 1974, Koshi en 1986 y Ozaki en 1993[Ozaki, 93]. Este problema ha sido de fundamental importancia no solamente por razones teóricas, ya que permite la conexión entre las teorías del comportamiento individual (microscópico) y del comportamiento global (macroscópico) del flujo de tráfico, si no también por razones prácticas puesto que es la piedra angular para el desarrollo de herramientas precisas de simulación y de control. Los modelos de seguimiento vehicular propuestos son en general compuestos de ecuaciones diferenciales, o de diferencias, determinísticas que relacionan el cambio en la aceleración del seguidor a las variables como la velocidad relativa y la separación relativa entre los vehículos. Su complejidad analítica a sido incrementada con mayor precisión y propósitos generales.

En este trabajo, un nuevo enfoque basado en la modelización con lógica difusa es propuesto para representar mas eficientemente el comportamiento del seguimiento vehicular del tráfico. El propósito general de la teoría de la lógica difusa ha sido el de proveer una herramienta para auxiliar en el modelado de procesos complejos, especialmente aquellos que involucran el comportamiento humano. Este enfoque ha dado en muchas aplicaciones un incremento en la exactitud y la robustez para el modelado de este tipo de situaciones.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS MODELOS DE SEGUIMIENTO VEHICULAR

Los modelos numéricos de seguimiento vehicular han sido establecidos a partir de experimentos de campo a principios de los años 50 a través de observaciones directas del comportamiento de las parejas formadas por los vehículos y los conductores. La forma analítica que ha sido propuesta para el modelo básico de seguimiento vehicular está más que todo basada en el conocimiento intuitivo de que la aceleración del seguidor debe decrecer con el aumento de su velocidad relativa en relación con el vehículo seguido.

Esto ha llevado a la simple expresión:

$$A_{n+1}(t+T) = \lambda(v_n(t) - v_{n+1}(t)) \quad (1)$$

donde A_{n+1} es la aceleración del $(n+1)^{\text{ésimo}}$ seguidor, v_n y v_{n+1} son las velocidades del $(n)^{\text{ésimo}}$ y del $(n+1)^{\text{ésimo}}$ vehículo respectivamente, t es el tiempo corriente, T es un tiempo de atraso llamado tiempo de reacción y λ es un parámetro característico de la intensidad de reacción.

Para el vehículo líder, una expresión similar ha sido propuesta:

$$A_1(t+T) = \lambda(v_D(t) - v_1(t)) \quad (2)$$

donde v_D es la velocidad deseada del líder.

A partir de este modelo básico, y observando que los datos calculados y los datos experimentales estaban lejos de concordar en muchas situaciones de tráfico, modelos de mayor complejidad fueron propuestos. Por ejemplo, el quinto modelo de General Motors que reajusta principalmente al parámetro de reacción, se expresó de la forma siguiente:

$$A_{n+1}(t+T) = \alpha \frac{(v_{n+1}(t))^\beta}{(x_n(t) - x_{n+1}(t))^\gamma} (v_n(t) - v_{n+1}(t)) \quad (3)$$

donde α , β y γ son parámetros positivos.

Sin embargo, a pesar del incremento de complejidad de éste modelo, no fue obtenido significativo aumento en la exactitud para aproximar a la relación entre la velocidad relativa y la razón de aceleración obtenida de los resultados de los experimentos de campo, varios autores se refieren a estos datos como la "banda sombreada" [May, 90].

Regresando al modelo básico (1), el cual a primera vista parece arbitrario, es posible darle algún respaldo de la teoría de la cibernética, la cual permite el análisis de la interacción dinámica entre el hombre y la maquina. En este caso, un posible modelo del comportamiento del conductor debe incluir las siguientes funciones:

detección de la diferencia entre la velocidad actual y la deseada (v_D),

toma de decisión,

acción sobre palancas de control (acelerador y frenos).

Suponiendo que la toma de decisión es instantánea, un modelo gráfico del conductor puede ser el siguiente (Figura 1):

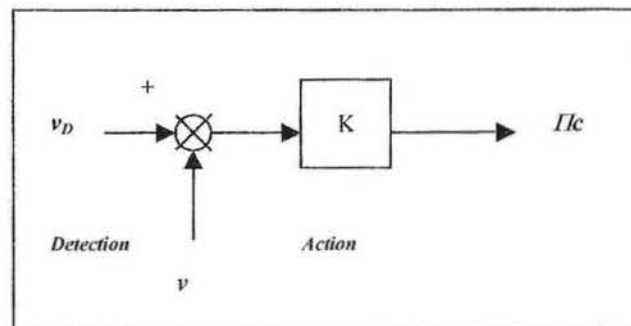


Figura 1. Modelo gráfico básico del conductor

Aquí K es el parámetro de reacción y π_c es el impulso, o frenado, ordenado por el conductor. Puesto que el motor y el sistema de frenos presentan siempre alguna inercia, la acción efectiva será relacionada al control de las palancas a través de un filtro dinámico (en el cual puede ser incluida también parte del tiempo de reacción del conductor). En el caso de un filtro de primer orden, tendremos para la fuerza motriz la siguiente ecuación dinámica:

$$\tau \frac{d\pi_e}{dt} + \pi_e = \pi_c \quad (4)$$

donde τ es una constante de tiempo que caracteriza la respuesta dinámica del actuador (fig. 2).

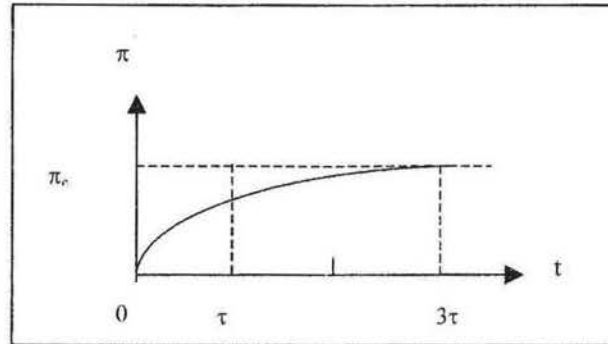


Figura 2. Respuesta de primer orden del actuador

Finalmente, para el par vehículo-conductor, obtendremos la siguiente estructura cibernética de lazo cerrado:

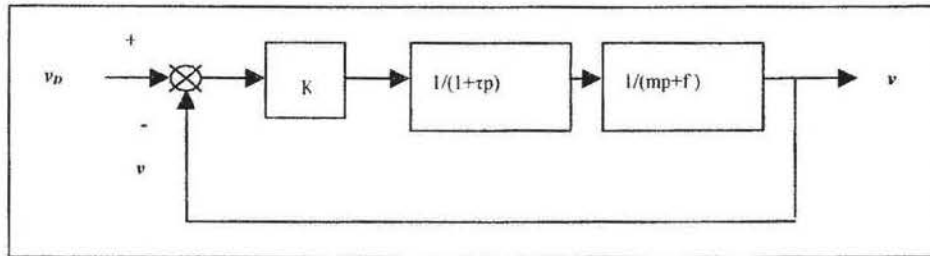


Figura 3. Estructura de control de lazo cerrado para el par vehículo-conductor

Donde p es el operador de diferenciación de Laplace. Aplicando el principio fundamental de la mecánica al desplazamiento longitudinal del vehículo sobre una superficie plana obtenemos entonces:

$$m \frac{dv}{dt} = -fv + \pi_e \quad (5)$$

donde m es la masa del par vehículo-conductor y f es el coeficiente de fricción.

Aquí los efectos aerodinámicos son despreciados puesto que la fricción se supone lineal con respecto a la velocidad (sin embargo una linealización de la ecuación completa de la velocidad deseada debe

llevar de nuevo a un modelo lineal). Entonces la razón de aceleración $a(t)$ y la velocidad son relacionados por:

$$m * a(t) = -f * v(t) + \frac{K}{1 + \tau p} (v_D - v(t)) \quad (6)$$

y si el coeficiente de fricción es despreciado, la relación viene a ser:

$$a(t) = \frac{K / m}{1 + \tau p} (v_D - v(t)) \quad (7)$$

el cual es comparable con la relación (1), con $v_D = v_n$, y con la relación (2). En la relación (7) el retardo no es un atraso puro, sino es el resultado de la respuesta dinámica del par vehículo-conductor.

Sin embargo, las expresiones (1) y (7) son muy próximas y las ecuaciones obtenidas justifican en alguna manera la forma del modelo básico de seguimiento vehicular. Profundizando más, si un periodo de muestreo T es realizado sobre $v(t)$ y $a(t)$ suponiendo que están relacionados por (7), se obtiene la siguiente relación discreta [Mora-Camino, 93]:

$$a(kT) = K / m [v_D((k-1)T) - v_{n+1}((k-1)T)] + e^{-T/\tau} \{a((k-1)T) - K / m [v_D((k-2)T) - v_{n+1}((k-2)T)]\} \quad (8)$$

Entonces, si la constante de tiempo de reacción τ del par conductor-vehículo es mucho más pequeña que el periodo de muestreo T , una buena aproximación de la anterior relación es dada por:

$$a(kT) = K / m [v_D((k-1)T) - v_{n+1}((k-1)T)] \quad (9)$$

la cual es de hecho una versión discreta de la relación (1) con un atraso efectivo igual al periodo de muestreo. Observe que aquí otra vez aparecen tres parámetros: un coeficiente de reacción específico (K/m), una constante de tiempo (τ o bien T) y una velocidad objetivo (v_D o sea $v_n(t)$).

3. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA LÓGICA Y EL MODELADO DIFUSOS

En la teoría de los conjuntos difusos, a cada variable lingüística se asocia siempre un conjunto difuso A definido sobre un universo de discurso X por una función característica: $\mu_A: x \rightarrow [0,1]$. Por ejemplo, para una cierta vía de tráfico, el término o la variable difusa “*alta velocidad*” puede ser asociado a la función de pertenencia expresada en la figura 4.

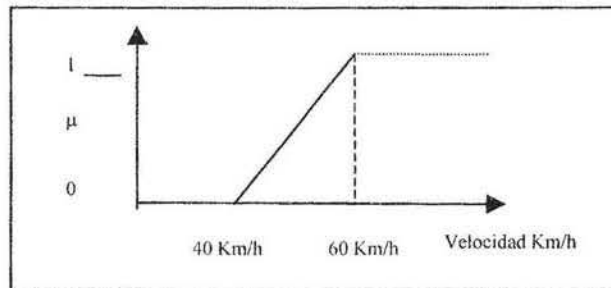


Figure 4. Función de pertenencia para la variable “*alta velocidad*”

Las operaciones clásicas de la teoría de los conjuntos pueden ser aplicadas a los conjuntos difusos usando los operadores *max*, *min* y *complemento a la unidad* sobre las funciones de pertenencia:

$$\begin{aligned}\mu_{A \cup B}(x) &= \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, \\ \mu_{A \cap B}(x) &= \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, \\ \mu_{\bar{A}} &= 1 - \mu_A\end{aligned}\quad (10a)$$

Siendo b una variable difusa (fig. 5) y A un conjunto difuso en X , " b es A " constituye una proposición difusa p cuyo grado de verdad es dado por:

$$v(p) = \sup_{x \in X} \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, \quad (10b)$$

donde B es el conjunto difuso asociado a b . Entonces, una regla de lógica difusa relaciona dos proposiciones difusas: "*Si b es A entonces c es D* ", donde b y c son variables difusas, b es la variable de entrada de la premisa, c es la variable de salida de la conclusión, A y D son valores lingüísticos (etiquetas) representados como subconjuntos difusos de los respectivos universos de discurso X y Y respectivamente. Cuando la conclusión de la regla es una proposición difusa, esta corresponde al modelo de Mamdani, y cuando la conclusión de la regla es una función matemática lineal que depende del valor de las variables difusas de entrada, se trata del modelo de Sugeno. La conclusión global es obtenida a través de un proceso de ponderación (inferencia difusa) aplicado a las salidas de las reglas activadas [Takagi- Sugeno, 85].

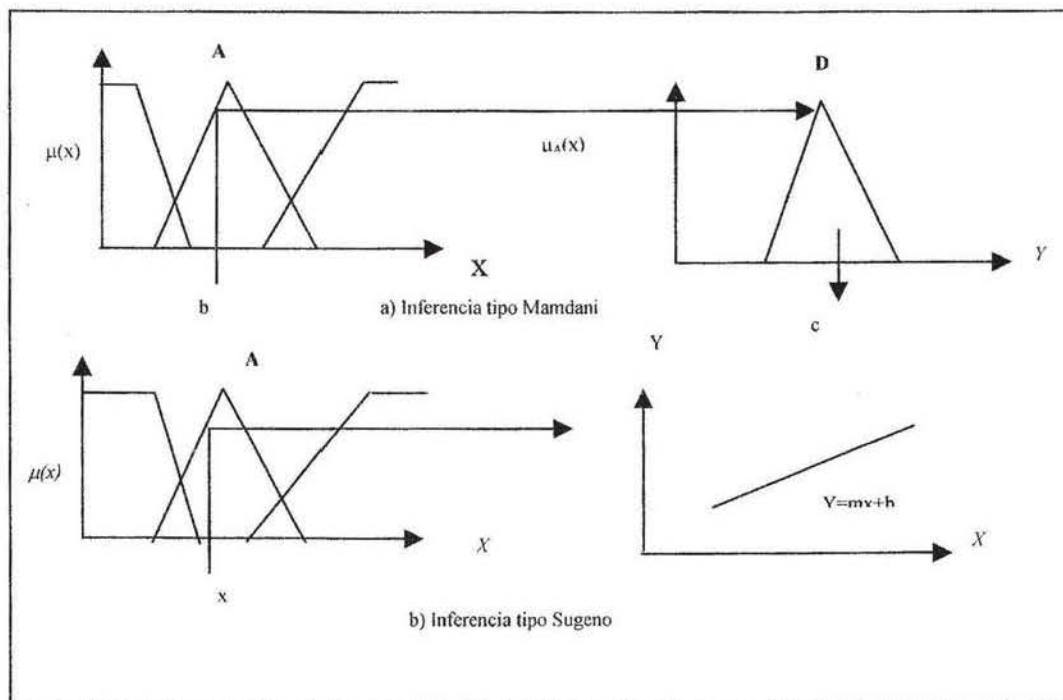


Figura 5. Inferencia difusa según Mamdani y Sugeno.

Modelado difuso: El término modelado difuso usualmente se refiere a técnicas y algoritmos para la construcción de modelos difusos sobre la base de la observación [Takagi-Sugeno, 85, Jang, 95]. Dos enfoques principales para integrar conocimiento especializado y datos experimentales en un modelo difuso han sido desarrollados. En el primero, llamado “*el enfoque basado en el conocimiento*”, el conocimiento experto es expresado en forma verbal y trasladado a una colección de reglas *si-entonces*. En el segundo enfoque, el modelo difuso es extraído numéricamente de los datos experimentales disponibles. Los dos enfoques pueden ser combinados con éxito de acuerdo a la aplicación. Es viable también distinguir entre reglas descriptivas y normativas, las cuales son respectivamente tales que: “*si la velocidad es baja entonces el peligro es bajo*” y “*si la separación es grande y la velocidad es muy baja y la velocidad es decreciente entonces la aceleración debe ser alta*”.

4. INTRODUCCIÓN DE LA LÓGICA DIFUSA EN EL MODELO DE SEGUIMIENTO VEHÍCULAR

Ya ha sido propuesto por varios autores, por ejemplo Kikuchi-Chakroborty (92), utilizar la lógica difusa para determinar la aceleración de un vehículo circulando detrás de otro, dadas su propia velocidad y su velocidad relativa con respecto al vehículo que está siguiendo (el líder). En este intento los modelos analíticos han sido remplazados por un sistema entrada/salida compuesto de un conjunto de reglas cuyos consecuentes son la predicción de la razón de aceleración. En este caso no se hace ninguna distinción entre la dinámica del vehículo derivada de las leyes de la física y la reacción del conductor. Este enfoque propuesto no parece ser lo suficiente adecuado para predecir importantes propiedades como la estabilidad individual y de grupo dentro del flujo de tráfico que en este caso tienen que ser estudiadas a través de pesadas simulaciones numéricas [Henn, 97].

En el enfoque propuesto en el presente estudio una expresión un poco diferente del modelo básico de seguimiento vehicular es escogida:

$$A_{n+1}(t+T) = \lambda(t)[v_{n+1}^t(t) - v_{n+1}(t)] \quad (11)$$

Donde v_{n+1}^t es la velocidad objetivo del conductor del vehículo seguidor al instante t . Aquí se propone limitar el uso de la lógica difusa a la estimación de los parámetros de comportamiento relacionados con el conductor, como por ejemplo el parámetro de reacción instantánea $\lambda(t)$ y la velocidad objetivo v_{n+1}^t . Con respecto al parámetro de reacción instantánea $\lambda(t)$, viendo la relación (3) es obvio que reglas difusas tales como: “*si la velocidad es alta y la separación es pequeña entonces la reacción es fuerte*”, pueden ser fácilmente establecidas. Entonces será posible construir un conjunto de reglas difusas basadas en el conocimiento experto que tome en cuenta aspectos relacionados con la eficiencia, la seguridad y el confort de la conducción, para que se determine en términos lingüísticos, siguiendo el enfoque de Mamdani, el valor del parámetro de reacción instantánea. Para hacer efectivo este enfoque, conjuntos difusos deben ser definidos para las variables cualitativas asociadas a las variables de posición, velocidad y razón de aceleración. El enfoque propuesto por Henn (97) para resolver simplemente este punto hace uso de funciones de pertenencia triangulares complementarias (fig. 6). Esta solución parece aceptable y es adoptada en este trabajo. Con relación a las expresiones lingüísticas que pueden cualificar el parámetro de reacción instantánea, se utilizan aquí conceptos básicos de la teoría del control y de la cibernética, para asociar de forma clara un conjunto difuso a cada una de ellas.

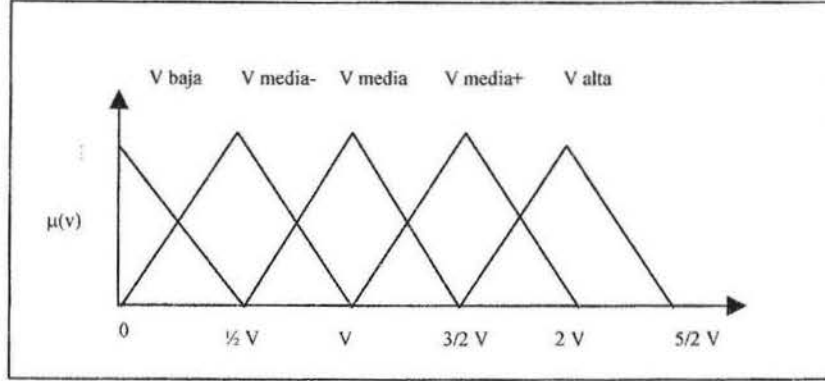


Figura 6. Conjuntos difusos asociados a la velocidad

De hecho, el par vehículo-conductor puede ser considerado [Mora-Camino, 93] en este caso como un sistema de lazo cerrado de segundo orden (fig. 3) cuyo comportamiento dinámico es principalmente determinado por el factor de amortiguamiento z (nótese que aquí la frecuencia natural ω del sistema es inversamente proporcional a z). Transformaciones elementales de la función de transferencia de este sistema nos lleva a identificar las relaciones:

$$z = \frac{1}{2} \sqrt{(m/K\tau)} \quad \text{y} \quad \omega = 1/(2\tau z) \quad (12)$$

$$\text{con} \quad \lambda(t) = K/m \quad (13)$$

Entonces es conocido [Mora-Camino, 93] que una reacción “fuerte” y “rápida” para un sistema dinámico de segundo orden será obtenida cuando z sea mucho menor que la unidad, que una reacción “mediana” será obtenida cuando z sea aproximada a la unidad y que una reacción “lenta” y “débil” será obtenida cuando z sea mucho más grande que la unidad. Esta observación sobre la relación (12) permite entonces establecer un mapa difuso para el parámetro de reacción instantánea $\lambda(t)$ (fig. 7).

Con relación a la velocidad objetivo del conductor, esta puede ser considerada como una combinación variable entre la velocidad del vehículo seguido (consideraciones de seguridad) y una velocidad libre deseada v_D por el conductor del vehículo seguidor. Esto puede ser representado por la siguiente relación:

$$v_{n+1}^i(t) = \delta(t) v_n(t) + [1 - \delta(t)] v_{n+1}^D \quad \text{con} \quad 0 \leq \delta \leq 1 \quad (14)$$

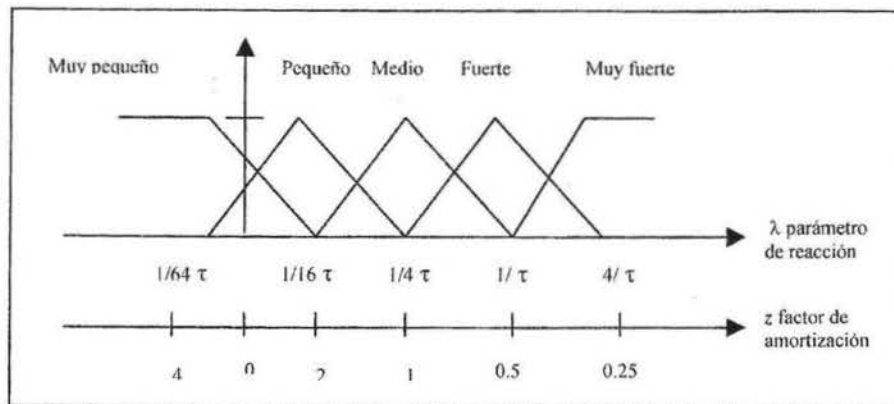


Figure 7. Mapa difuso para el parámetro de reacción

donde $\delta(t)$, que es una evaluación subjetiva de la proximidad del vehículo seguido, que puede ser estimada por medio de un conjunto difuso de reglas de tipo Mamdani cuyas entradas son principalmente relacionadas con la distancia relativa y la velocidad entre los vehículos $n+1$ y n .

Finalmente, se considera que la velocidad deseada v_{n+1}^D es independiente del tráfico y que está relacionada con las características generales de la vía de comunicación (geometría, calidad del pavimento y de la señalización, ocupación lateral, etc.), un conjunto de reglas difusas del tipo Sugeno puede ser utilizado para establecer este valor, que será calculado de una vez a partir de las características de la vía. En este caso, funciones lineales tales como:

$$v_{L^k}^{Dk} = v_{L^0}^{D0} \left(1 + c_L (L^k - L^0) + c_W (W^k - W^0) + c_O (occ^k) \right) \quad (15)$$

donde L es la longitud, W es el ancho y occ es el grado de ocupación lateral de la k^{th} vía de interés mientras que el índice 0 indica un valor de referencia media, pueden ser utilizadas.

5. CONSIDERACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN EN UN SIMULADOR DE TRÁFICO MICROSCÓPICO.

En este párrafo, algunas consideraciones para la aplicación del enfoque de modelado propuesto a simulaciones microscópicas de tráfico urbano o de tráfico en autopistas, son presentadas. Obviamente, el enfoque propuesto para el modelado de la razón de aceleración de un par vehículo-conductor no puede ser repetida cada vez que un nuevo vehículo entra en la vía o la sección de estudio. De hecho, el modelo de seguimiento vehicular obtenido puede ser utilizado para representar el comportamiento medio de pares vehículo-conductor cuando los datos necesarios para establecer las reglas difusas son obtenidos a través de una técnica de "cross section". Esto es posible porque en la expresión adoptada para el modelo de seguimiento vehicular, los parámetros individuales tales como la masa del vehículo y las diferentes constantes de tiempo no aparecen de forma explícita. Entonces, distribuciones de probabilidad pueden ser asociadas a variables y parámetros tales como $\lambda(t)$, $\delta(t)$ y v^D para capturar la variabilidad observada del comportamiento de los pares vehículo-conductor en el flujo de tráfico. Observe también que hay una confusión frecuente entre las nociones de difuso y de estocástico, puesto

que un modelo difuso es siempre determinístico (a las mismas premisas provee siempre las mismas conclusiones) aunque represente una vaga relación de causalidad. Así, para obtener una representación realista del flujo de vehículos, la variabilidad puede ser asegurada en el presente caso por adición de perturbaciones con distribuciones de probabilidad seleccionadas para algunos de los parámetros de comportamiento.

Considerando la cuestión de la estabilidad al nivel individual, las técnicas de análisis de la teoría del control automático, tales como el diseño del "Root Locus", aplicadas al modelo seleccionado (11) pueden ser de interés directo para mostrar que no importa el valor (positivo) del parámetro de reacción, el comportamiento del par vehículo-conductor es siempre estable, mismo si oscilaciones en su velocidad pueden aparecer cuando el parámetro de reacción corresponde a factores de amortiguamiento menores que $\sqrt{2}/2$. Cuando se considera la estabilidad a nivel del flujo de vehículos, los tópicos principales de análisis son la estabilidad global y la dispersión del flujo de tráfico. Adoptando un valor medio para el parámetro de reacción de cada par vehículo-conductor, es posible estudiar la estabilidad de una serie de vehículos en función del número de vehículos dentro de esta. También es posible estudiar el fenómeno de dispersión del flujo de tráfico relacionándolo con una constante de tiempo expresada como:

$$\theta_{n+1} = \sum_{k=0}^n (\tau_{k+1}/\lambda_{k+1}) \quad (16)$$

Estas propiedades pueden ser visualizadas a través de simulación numérica directa de un grupo de vehículos. Sin embargo, cuando oscilaciones están presentes, para prevenir colisiones irreales que pueden acontecer cuando el líder desacelera (la serie de vehículos simulada es calculada hacia atrás, es decir a partir del líder y terminando con el último vehículo de la vía), un valor máximo para el parámetro de reacción instantánea debe ser introducido como medida de seguridad, sea explícitamente a través de una prueba lógica en el valor de $\lambda(t)$ o sea implícitamente mediante algunas reglas de tipo Mamdani.

Entonces los pasos de computación en tiempo $t + \Delta t$ para calcular la razón de aceleración del líder ($n=0$) así como para los seguidores son:

- 1) Calcular $v_{n+1}^D(t)$ y $\lambda_{n+1}(t)$ a partir de modelos de inferencia difusos,
- 2) Limitar el valor del parámetro de reacción para eliminar la posibilidad de colisión ($\lambda_{n+1} \leq \lambda_{n+1}^{\max}$),
- 3) Calcular $A_{n+1}(t+\Delta t) = \lambda_{n+1}(t)(v_{n+1}^D(t) - v_{n+1}(t))$,
- 4) Si $v_{n+1}(t) < v_{n+1}^D(t)$ entonces $a_{n+1}(t+\Delta t) = \min \{a_{n+1}^{\max}, A_{n+1}(t)\}$
donde $a_{n+1}^{\max} = \pi_{\max}/m$ es la aceleración máxima posible, si $v_{n+1}(t) \geq v_{n+1}^D(t)$ entonces $a_{n+1}(t+\Delta t) = \max \{a_{n+1}^{\min}, A_{n+1}(t)\}$ donde $a_{n+1}^{\min} = \pi_{\min}/m$ es la desaceleración mínima posible del líder.

Observe aquí que $A_{n+1}(t+\Delta t)$ es la aceleración deseada por el conductor, mientras que $a_{n+1}(t+\Delta t)$ es la aceleración efectiva del par vehículo conductor en el instante $t+\Delta t$.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo, la teoría clásica de seguimiento vehicular que está originalmente basada en la representación intuitiva del comportamiento del conductor, ha sido analizada y confirmada desde el punto de vista de la teoría de la cibernética. Entonces, un nuevo enfoque, basado en diversos modelos difusos, ha sido propuesto para estimar los principales parámetros del modelo básico de seguimiento vehicular. Este enfoque, contrariamente a otros enfoques que contemplan la lógica difusa, mantiene la estructura del modelo clásico de seguimiento vehicular, limita su complejidad y provee un medio para tomar en cuenta parámetros de corte cualitativo que influyen el comportamiento de los conductores. Así se espera que este trabajo contribuya para una mejor representación del tráfico en el ámbito microscópico.

Referencias

- Edie, L.C., Car Following and steady-state theory for non-congested traffic. **Operations Research**., 1961, 9(1), 66-76.
- Gazis, D., C., Herman, R., y Potts, R., B., Car-Following Theory of Steady State Traffic Flow. **Operations Research**, Vol. 7, 1959, pp. 499-505.
- Gonzalez-Rojo S., Traffic Actuated Fuzzy Control, Proceedings World Automation Congress WAC98, Anchorage, Alaska, 1998 TSI Press.
- Gonzalez-Rojo S., Control de Tránsito Urbano con Lógica difusa: Una Herramienta de la Inteligencia, **Premio Nacional Banobras**, Cd. de México 1997.
- Henn, V., Modèle de Poursuite utilisant les techniques de la logique floue, **Recherche Transports Securite n° 54**- pp. 15-25, January-March 1997.
- Herman, R. y Rothery, R. W., Car Following and Steady State Flow, **Proceedings of Second International Symposium on Transportation and Traffic Theory**, 1963, 1-11.
- Jang, J.-S. Roger y C.-T. Sun., Neuro-Fuzzy Modeling and Control", **Proceedings of the IEEE**, Vol. 83, No. 3, pp 378-406, March 1995.
- Kikuchi, S., y Chakroborty P., Car-Following Model based on fuzzy inference system, **Transportation Research Record**, n° 1365, p. 82-91, 1992.
- Mamdani, E., y Assilian, S., An Experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, **International Journal of Man-Machine Studies** 7, 1-13.
- May, A.D., Traffic Flow Fundamentals, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N., J., 1990.
- Larminat, P., Automatique Commande des systèmes linéaires, ed. **Hermes**, Paris, 1993.
- Mora-Camino, F., Automatique Linéaire Continue, **Ecole Nationale Supérieure de l'Aviation Civile, ENAC, Toulouse, Fr.**, 1993.
- Jang, J.-S. Roger y Gulley, N. Matlab®: Fuzzy Logic ToolBox User's Guide, **The MathWorks, Inc.** 1998.
- Ozaki, H., Reaction and anticipation in car-following behavior, **Proc. of 12th International symposium on the theory of traffic flow and Transportation**, Elsevier ed., p. 349-366, 1993.
- Pedricz, W., (1993). Fuzzy control and fuzzy systems. Second extended version. **John Wiley**.
- Takagi, T., y Sugeno, M., (1985). Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modelling and Control, **IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics**, 15(1), 116-132.
- Yager, R., R., y Filev D.P., Essentials of Fuzzy Modeling and Control, **John Wiley**, 1994.
- Zadeh, L.A., Fuzzy Sets, **Information and Control**, vol. 8, pp. 338-353, 1965.