

01190



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN INGENIERIA

UN MODELO DE AUTOMATAS CELULARES PARA EL
TRANSITO VEHICULAR EN CARRETERAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTORA EN INGENIERIA (SISTEMAS)

P R E S E N T A

MARIA ELENA LARRAGA RAMIREZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. J. ANTONIO DEL RIO PORTILLA

MARZO 2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

A Daniel: Tu amor y ánimo constante me alientan todos los días.

A Illians: Te quiero flaca

Tabla de Contenido

Resumen	III
Abstract	V
Introducción	1
1. Las teorías del tránsito vehicular	5
1.1. Introducción	5
1.2. Las variables fundamentales	6
1.2.1. El flujo	6
1.2.2. La velocidad	7
1.2.3. La densidad	7
1.3. Clasificación de los modelos	8
1.3.1. Modelos microscópicos	9
1.3.2. Modelos macroscópicos	9
1.3.3. Modelos mesoscópicos	10
1.3.4. Fluctuaciones y estabilidad del flujo	10
1.4. Teorías del tránsito vehicular: Antecedentes	11
2. Un modelo con anticipación variable	16
2.1. Introducción	16
2.2. El modelo de Nagel-Schreckenberg	17
2.2.1. El diagrama fundamental del modelo NaSch	19
2.3. Un nuevo modelo de un solo carril	20
2.3.1. Definición del modelo	20
2.4. Resultados de simulación	24
2.4.1. Comparación con el tránsito real manual	25
2.4.2. Modelación con anticipación variable	27
2.5. Resultados analíticos	34
2.5.1. Estructura de los estados mixtos	34
2.5.2. Estructura de los estados congestionados	36
2.5.3. Regiones de estabilidad	37
2.6. Comentarios del capítulo	38
3. El modelo con varios carriles	40
3.1. Introducción	40
3.2. Consideraciones para la modelación	40

3.3. El modelo simétrico	42
3.3.1. Resultados de simulación	44
3.4. El modelo asimétrico	46
3.4.1. Resultados de simulación	48
3.5. Comentarios del capítulo	55
4. Simulación de estados transitorios en la autopista México-Cuernavaca	57
4.1. Introducción	57
4.2. La modelación de las rampas	58
4.3. La modelación de las fronteras	60
4.4. Resultados de simulación	62
4.4.1. Sentido México-Cuernavaca	64
4.4.2. Sentido Cuernavaca-México	66
4.5. Comentarios del capítulo	69
Conclusiones	71
Apéndice 1: Analogía con flujo granular	75
Apéndice 2: Ajustando el modelo	82
Bibliografía	84

Resumen

Pronosticar los impactos que los diferentes esquemas de anticipación juega un papel esencial para proponer nuevas alternativas para mejorar el desempeño de tránsito. En este trabajo se presenta un modelo de Autómatas Celulares (AC) para el tránsito vehicular. El modelo extiende el trabajo de Kai Nagel y Michael Schreckenberg para capturar las reacciones de los conductores con la finalidad de mantener seguridad en la carretera. Como consecuencia, se incluye un parámetro de anticipación en el modelo. Este parámetro se puede relacionar con otros parámetros de análisis de seguridad, para sistemas de tránsito manual y automatizado. Mediante un ajuste adecuado de este parámetro se pueden describir diferentes situaciones del tránsito, manual, automatizado y mixto.

Los resultados de simulación de una carretera de un solo carril, con topología de anillo, confirman que este modelo es capaz de reproducir los regímenes más comunes en tránsito vehicular: flujo libre, flujo mixto y flujo congestionado. La relación que se obtiene de las curvas densidad/velocidad y densidad/flujo están en concordancia con los diagramas fundamentales empíricos. También se encuentra que la influencia de la variación de la velocidad sobre el flujo, es un factor un factor de gran importancia en el tránsito sincronizado. Aún más, los resultados de simulación para esquemas de conducción que se asocian a niveles de anticipación intermedios indican que el modelo exhibe separación de fase en un cierto régimen de densidad en una región de flujo libre y el denominado pelotón- v_{pl} . En estos pelotones densos, los vehículos se mueven con la misma velocidad v_{pl} y la brecha se desvanece. Estos estados son similares a los estados de velocidad homogénea que se han observado empíricamente y se pueden relacionar a, por ejemplo, los esquemas de pelotón en los Sistemas de Carretera Automatizados (SCA). Uno de los objetivos es mostrar la flexibilidad de la aproximación de AC para problemas de tránsito vehicular más complejos. Los resultados que aquí se presentan son relevantes para establecer niveles adecuados de seguridad y anticipación, tanto para SCA como también en el tránsito real.

Además, se discute una extensión del modelo de AC para el tránsito vehicular de dos carriles. El análisis se enfoca en la reproducción de la inversión del uso de carril y el número de cambios de carril dependiente de la densidad. Se muestra que la dinámica de un solo carril se puede extender para el caso de dos carriles sin cambiar las propiedades básicas del modelo. Por lo tanto, es posible reproducir diversos fenómenos de dos carriles que se han observado empíricamente. Con base en la simplicidad del modelo, se investiga una aplicación en la autopista México-Cuernavaca. Los resultados muestran que el congestionamiento que se observa en días de asueto en esta autopista no sólo se ocasiona por la topología compleja de la misma, el problema principal reside en un sistema de cobro ineficiente. Los resultados indican que el modelo de multicarril se podría utilizar para investigar nuevas alternativas para mejorar el desempeño del tránsito en las carreteras.

Abstract

Forecasting the impact of different anticipation schemes plays an essential role in order to propose new alternatives to improve the management of traffic. In this work, a Cellular Automata (CA) model for traffic flow is introduced. The model makes a simple and natural modification of the rules of the Nagel-Schreckenberg model to better capture reactions of the drivers intended to keep safety on the highway. As a result, an anticipation parameter is included in the model. This parameter can be related to other safety analysis for manual and automated highway systems. By appropriately tuning this parameter, different traffic situations of manual, automated and mixed traffic can be described.

Simulation results for one-lane highway with a ring topology confirm that this CA model can reproduce most common regimes in traffic: free flow, mixed flow and congested flow. The relations derived from the density/velocity and density/flow curves are in agreement with the empirical fundamental diagrams. The influence of the variation of speed on the flow is also found to be a factor of great importance in traffic synchronization. Moreover, simulation results for driving schemes associated to intermediate-levels of anticipation indicate that the model exhibits phase separation in a certain density regime into a free-flow region and so-called v_{pl} -platoons. In these dense platoons, vehicles move with the same velocity v_{pl} and have vanishing headway. These states are similar to the empirically observed homogeneous-in-speed states and can be related to, for example, platoons schemes in Automated Highway Systems (AHS). One of the goals of this work is to show the flexibility of the CA approach to more complex traffic flow problems. The results presented here are relevant to establish suitable levels of safety and anticipation not only for AHS, but also in real traffic.

Moreover, a two-lane extension of the cellular automaton model for traffic flow is discussed. The analysis focuses on the reproduction of the lane usage inversion and the density dependence of the number of lane changes. It is shown that the single-lane dynamics can be extended to the two-lane case without changing the basic properties of the model. Therefore it is possible to reproduce various empirically observed two-lane phenomena. By considering the simplicity of the multi-lane model, an application to the freeway Cuernavaca-Mexico of Mexico is investigated. Simulation results show that the congestion observed on days-off in this freeway is not only a consequence of the complex topology of the freeway, the main problem lies in the fact that there is an inefficient system of toll. Results indicate that the microscopic multi-lane model could be used to investigate new alternatives to improve the management of traffic flow.

Agradecimientos

Agradezco al Dr. J. Antonio del Río, mi tutor, por su paciencia y los conocimientos transmitidos, pero sobre todo por ese lado humano que antepone en todo momento y ser un gran amigo.

Agradezco a mi comité tutorial la Dra. Angélica Lozano Cuevas y el Dr. L. Agustín Álvarez Icaza-Longoria, por sus valiosas observaciones y aportaciones durante la realización de la investigación que enriquecieron este trabajo.

A cada uno de los miembros del jurado asignado para la revisión de la tesis cada uno de sus comentarios: Dr. Luis Chías Becerril, Dr. Ricardo Aceves García, Dr. Felipe Lara Rosano y Dr. J. pablo Antún Callaba.

Al Dr. Andreas Schadschneider de la universidad de Colonia, Alemania, le agradezco su paciencia, amabilidad y por los conocimientos transmitidos.

A la Dirección general de Estudios de Posgrado por la beca otorgada para la realización de mis estudios de doctorado.

A la Sec. Martha Torres, de la coordinación de Sistemas.

Agradezco al Centro de Investigación en Energía-UNAM por todas las facilidades proporcionadas durante mi estancia. En especial, al Ing. Alfredo Quiroz Ruiz y al Ing Héctor D. Cortés González de la unidad de cómputo. A los doctores Mariano López de Haro por su apoyo y Sergio Cuevas García por el ánimo transmitido.

Al M.C. Daniel Rivera, te agradezco todo, tu apoyo, constancia y amor.

A mis amados padres, Elena y Willy, mis hermanos Sandra, Gaby, Erika, Willy y mis queridos sobrinos. Gracias por estar siempre conmigo y su gran cariño que me fortalece siempre.

A Susana y Sebastián, gracias por estar siempre.

A mis amigos que me dieron ánimo y me apoyaron siempre: M.I. Gabriela Hernández Luna, M.C. Irene Ayaquica, Dr. Oscar Jaramillo, M.O. Alejandro Lambert, Fis. Miller Toledo, Dr. Guillermo Ibáñez. M.C. Marcela Rivera. Los quiero, gracias.

Introducción

La supervivencia de los seres humanos y la interacción en sociedad dependen en gran manera de la capacidad para trasladar personas y bienes. Los sistemas de movilidad eficaces son elementos esenciales que facilitan el desarrollo económico: *las ciudades no podrían existir sin sistemas que permitieran el transporte de personas y bienes de forma económica y eficaz*. Debido a esto, que una gran parte del Producto Nacional Bruto (PNB) de los países industrializados se absorbe por el transporte, el comercio y la telecomunicación. Estados Unidos, por ejemplo, invierte el 14.8 % del PNB únicamente en el transporte. El transporte ha llegado a ser una de las condiciones básicas para el progreso económico de un país.

El transporte genera algunos efectos positivos, como el incremento de la prosperidad económica y la movilidad individual. El continuo incremento de la economía a nivel mundial en las últimas décadas, ha contribuido en un incremento de la demanda de transporte, que implica efectos negativos como la congestión vial, la contaminación del aire y el incremento de los accidentes. En lo que al ambiente se refiere, una fracción significativa de la contaminación ambiental en los países industrializados es consecuencia del alto congestionamiento vehicular, donde los vehículos contaminan el aire aún sin moverse. Basta tomar como un ejemplo el valle de México, una de las tres ciudades más contaminadas del mundo, donde el 75 % de la contaminación atmosférica proviene del transporte. El tránsito vehicular produce el 55 % de todos los hidrocarburos, el 72 % de todos los óxidos de nitrógeno, 26.8 % de todo el bióxido de azufre y 99.5 % del monóxido de carbono (mismos que son precursores de la formación de ozono) (SMA, 2003).

Este continuo incremento de la demanda del transporte de vehículos motorizados en áreas metropolitanas, ha motivado a las autoridades alrededor del mundo a poner más énfasis sobre el mejoramiento de la eficiencia y la capacidad de los sistemas de carretera. Está cada vez más claro que construir más carreteras no es la solución a los problemas del transporte. Ante la situación descrita, lo que parece innegable es que el uso de nuevas tecnologías avanzadas de control e información en sistemas de transporte se ha convertido en una de las principales esperanzas para responder a cuestiones tan vitales como el congestionamiento vehicular o la seguridad vial. Para este propósito, la modelación del transporte y del medio ambiente se debe integrar con el uso de nuevas tecnologías de detección y localización, telecomunicaciones, electrónica, informática y sistemas de información geográfica. Un uso adecuado y coordinado de las estas tecnologías puede ser, sin duda, un medio

para reducir la congestión vehicular, la contaminación ambiental, el tiempo de viaje y hacer más seguros los desplazamientos por carretera. No obstante, para lograr estos objetivos es crítico un pronóstico aproximado de los impactos de estas tecnologías.

Explorar los impactos de usar estas tecnologías avanzadas sobre el tránsito real es muy costoso y no siempre es posible. Las simulaciones de computadora han ganado gran importancia como un medio para evaluar las estrategias de control y manejo de los sistemas de tránsito, debido a la posibilidad que ofrecen de considerar los aspectos dinámicos del tránsito vehicular y determinar el desempeño de una estrategia de determinada en un tiempo muy corto (ver por ejemplo (Eskafi et al., 1995; SIAS-Transport-Planners, 2002; Transport-Simulation-Systems, 2002)). Sin embargo, las simulaciones prácticas deben establecer una relación entre resolución, fidelidad y escala, es decir, entre el nivel de realismo de los objetos, el grado de realismo de cada entidad y el tamaño del problema.

Recientemente, existe la tendencia de tomar la ventaja de los modelos que se han desarrollado originalmente en otras áreas de la investigación, tal como la física, matemáticas y ciencias de la computación, y aplicarlas a micro-simulación del tránsito; pueden encontrarse algunos ejemplos en (Laboratory TRANSIMS, 2001; TRAF User Reference Guide, 1992).

En esta tesis se describirá un nuevo modelo para simular en tránsito vehicular que se basa en un modelo de autómatas celulares que se originó en el campo de la física estadística para estudiar el desempeño de partículas¹, el modelo de Nagel y Schreckenberg (aquí se referirá como NaSch) (Nagel y Schreckenberg, 1992). Los autómatas celulares son modelos dinámicos, donde el espacio, y el tiempo son discretos. Diversas aplicaciones de AC a tránsito vehicular pueden encontrarse en (Nagel, 1996; Schadschneider y Schreckenberg, 1993; Wolf, 1999). En el contexto del tránsito vehicular, una carretera se representa como una cadena de celdas regulares (igual tamaño). Cada celda puede estar vacía u ocupada por un vehículo, con una velocidad discreta. El estado global de la carretera evoluciona en pasos de tiempo discretos. La evolución obedece a un conjunto finito de reglas de interacción local, que pueden tener una influencia probabilista. El movimiento de los vehículos tiene lugar mediante el salto entre las celdas de acuerdo con su velocidad. Esta interacción local permite capturar dinámicas de micro-nivel y propagarlas a un desempeño de macro-nivel. Desde un punto de vista del tránsito vehicular, es posible relacionar los estados de las celdas con cantidades significativas, tal como el tiempo de viaje, la velocidad del vehículo, el flujo, etc.

La naturaleza discreta de espacio, tiempo y estado de los modelos de tránsito vehicular que se basan en AC permite cálculos muy rápidos en comparación con otras simulaciones. Modelos basados en AC han mostrado la capacidad para capturar apropiadamente el desempeño del tránsito real (Nagel, et al., 1998; Wolf, 1999). La velocidad de los cálculos de los modelos de AC, puede considerarse como un ventaja cuando se desea simular redes de carretera con miles de vehículos circulando sobre ella.

¹Por esta razón, los AC se refieren frecuentemente como modelos de partícula saltando

Cabe mencionar que aún cuando el modelo NaSch reproduce la relación flujo-densidad en forma cualitativa, se considera importante debido a que marcó la pauta para la modelación del tránsito con AC.

Con base en las ventajas que ofrecen los modelos de AC, en este trabajo se presentará e investigará un modelo nuevo de AC probabilista, para simular el desempeño que resulta de aplicar diferentes estrategias de conducción en el tránsito vehicular de carreteras. Las reglas que definen la dinámica del modelo NaSch² se modifican con la finalidad de capturar mejor la reacción de los conductores ante el tránsito y mantener seguridad sobre la carretera. Como resultado, se adiciona un nuevo parámetro en el proceso de desaceleración del modelo para determinar una distancia segura entre los vehículos, como función de la velocidad de los vehículos precedentes. Este parámetro permite variar la intensidad con la que un conductor anticipa la velocidad del vehículo que le precede. Aún cuando el objetivo del parámetro es considerar diferentes grados de agresividad de los conductores, se mostrará que puede relacionarse a otros parámetros de análisis de seguridad en Sistemas de Carretera Automatizados (como por ejemplo los que se presentan en (Álvarez y Horowitz, 1999; Godbole y Lygeros, 1994)).

El objetivo del trabajo es aprovechar las ventajas de los modelos de AC y proponer un modelo nuevo que permita simular diferentes situaciones de tránsito manual, automatizado y mixto, y evaluar el impacto que producen en el desempeño del tránsito vehicular.

En este trabajo se analizarán resultados de aplicar el modelo tanto a carreteras de un solo carril, como a carreteras de múltiples carriles, sobre diferentes topologías. Situaciones de tránsito más complejas, como la aplicación del modelo en redes urbanas, quedan fuera del alcance de este trabajo. No obstante, ya se ha mostrado que los modelos basados en AC son adecuados para ello.

El trabajo de tesis se presentará en la siguiente forma. Con la finalidad de ayudar al lector a un mejor entendimiento del trabajo, en el capítulo uno se presentará un resumen histórico de algunas teorías del tránsito vehicular. También se definirán algunos conceptos básicos para el estudio y la modelación del tránsito vehicular, como se enfoca en este trabajo.

En el capítulo dos se definirá un modelo nuevo para tránsito vehicular, que se basa en AC. Se mostrará que mediante la adición de un solo parámetro en el proceso de desaceleración es posible describir diferentes estrategias de conducción, que requieren diferentes intensidades de anticipación de la velocidad de los vehículos precedentes. Se presentarán resultados de simulación del modelo, así como resultados analíticos, para una topología de anillo, con un solo carril. Con la finalidad de mostrar la importancia de considerar la anticipación en la modelación del tránsito real, se presentará una comparación de los resultados de simulación con datos empíricos. Se mostrará la relevancia del modelo no sólo para sistemas de carretera automatizados, sino también para aclarar los efectos de la anticipación, que juega un papel esencial en los modelos de tránsito realísticos. Además, con el propósito de mostrar que el modelo es capaz de reproducir el desempeño caótico que algunas

²Primer modelo basado en AC aplicado con éxito al tránsito vehicular

veces se observa en el tránsito real, en densidades que corresponden a valores donde la congestión se empieza a formar, se presentará un análisis de la varianza de la velocidad promedio. Finalmente, se presentará una comparación entre los resultados analíticos y los resultados de simulación.

En el capítulo tres, se definirá un modelo de AC para modelar el tránsito de sistemas multicarriles. En particular, se presentarán resultados de simulación para sistemas con dos carriles, sin embargo, se mostrará que el modelo puede aplicarse a sistemas con más carriles sin cambiar su definición. Los resultados se presentarán para dos tipos de sistemas, con base en las reglas de cambio de carril: reglas de cambio de carril asimétricas (como en México) y reglas de cambio de carril simétricas (como en Estados Unidos de América). Para el caso específico de sistemas con reglas asimétricas, se enfocarán dos tipos de sistemas de acuerdo con el tipo de vehículos que se considera: sistemas homogéneos con un sólo tipo de vehículo (rápidos) y sistemas heterogéneos con vehículos lentos y rápidos. Se mostrará, que modelo reproduce diversos fenómenos que se han observado, como la inversión de uso de carril y la dependencia del número de cambios de carril en función de la densidad. El objetivo es mostrar que el modelo es robusto cuando se consideran diferentes tipos de vehículos, es decir, en densidades bajas el flujo vehicular no se dominará totalmente por la presencia de un bajo porcentaje de los vehículos lentos. Finalmente, se presentan resultados que indican que el modelo podría ser adecuado para determinar la existencia de estados coherentes, cooperativos, que se alcanzan de interacciones competitivas de los vehículos, que conducen a un nuevo fenómeno que recientemente se ha observado en el tránsito de carreteras. Este fenómeno se piensa que podría disminuir los accidentes en carreteras. No obstante, se enfatiza el requerimiento de otras medidas adicionales.

Por otra parte, con la finalidad de realizar una aplicación del modelo a carreteras mexicanas, en el capítulo cinco se presentará el resultado de analizar la autopista México-Cuernavaca. El análisis se presentará en forma independiente para cada sentido. Mediante resultados de simulación, se mostrará que el problema de congestionamiento que se registra en la autopista en días de asueto, no sólo es consecuencia de la topología de la carretera, el problema principal reside en un mal sistema de cobro en la caseta.

Por último, se presentarán las conclusiones de este trabajo.

Con la finalidad de mostrar que el modelo de AC puede utilizarse para modelar otros fenómenos físicos, se presentará en un apéndice una analogía de un caso específico del modelo con el desempeño que se observa en los flujos granulares, como en la arena. Para este propósito se utilizan algunos conceptos de física estadística. Mediante funciones de correlación de las velocidades individuales de los vehículos, como una función del espacio en el estado estable (donde las variables macroscópicas permanecen en promedio en el tiempo), se determinan los posibles estados que pueden obtenerse al variar la aleatoriedad del modelo. Se presentará una analogía de los parámetros del modelo para el desempeño correspondiente a flujos granulares (por ejemplo, arenas).

Capítulo 1

Las teorías del tránsito vehicular

1.1. Introducción

Las teorías de tránsito vehicular buscan describir en una forma precisa las interacciones entre los vehículos, los conductores y la infraestructura. El término infraestructura se refiere al sistema de carretera y sus elementos operacionales, e incluye los dispositivos de control, señalizaciones y marcas. De esta manera, estas conceptualizaciones son el fundamento para la elaboración de todos los modelos de tránsito vehicular y de las herramientas de análisis, que se usan para evaluar el diseño y operación de las calles y las carreteras.

El estudio sistemático del tránsito vehicular tuvo sus inicios en los años 30's, cuando la teoría de la probabilidad se aplicó para describir el tráfico de carreteras (Adams, 1936). Bruce D. Greenshields dirigió los estudios pioneros de modelos que relacionan el flujo y la velocidad (Greenshield, 1935) e investigó el desempeño del tránsito en intersecciones (Greenshield et. al., 1947). Después de la Segunda Guerra Mundial, el incremento del uso de automóviles y la expansión de los sistemas de carretera originaron que se incrementaran los estudios de las características del tránsito vehicular, que conllevó al desarrollo de nuevas teorías (Gartner, et. al., 1987). Fue en los años 50's que se desarrollaron diversas propuestas teóricas basadas en una variedad de aproximaciones, tal como la teoría que se basa en el "siguimiento de vehículos" (car following), la teoría de ondas de tráfico (analogía hidrodinámica) y la teoría de colas. Algunos de los trabajos pioneros de esos años incluyen los trabajos de (Reuschel, 1950; Wardrop, 1952; Pipes, 1953; Newell, 1955; Webster, 1959; Edie, 1958) y otros artículos por Herman et al. (Herman, 1992) (propuestas que se describirán más adelante). Como dato histórico, uno de los primeros éxitos en el análisis sistemático del tránsito vehicular se logró en los años 60's en el Túnel Lincoln, en Nueva York. El túnel Lincoln conecta Manhattan con el estado de Nueva Jersey (Greenberg y Daou, 1960) y representa un embotellamiento típico. Mediante el uso de semáforos en la entrada del túnel fue posible que se estabilizara un flujo vehicular alto y homogéneo, que de otra forma, solamente podía ser metaestable (flujos altos y bajos para una misma densidad) e inevitablemente decaía a una situación de congestión. Esta modificación que se realizó en la entrada del túnel condujo a un incremento del 20 % en el flujo vehicular, por lo tanto, se redujeron los efectos causados en la contaminación y se evitó la construcción de un

túnel adicional. De esta forma, con el análisis que se realizó en el túnel Lincoln, se demostró que la investigación del tránsito vehicular es fundamental para ayudar a resolver los problemas que se generan por la demanda vehicular alta.

Desde entonces, con la finalidad de hacer mejor uso de las infraestructuras de transporte, se incrementó el desarrollo de modelos nuevos de predicción y planeación del tránsito vehicular, más confiables que en el pasado. Desde luego, se han originado una amplia gama de modelos y teorías para describir los diferentes aspectos de las operaciones del flujo vehicular; ya sea mediante la consideración del desempeño de los conductores individuales debido a la influencia de los vehículos cercanos (modelos microscópicos), ó mediante el desempeño de los conductores sin distinguir explícitamente el desempeño espacio-temporal (modelos mesoscópicos) ó bien, desde el punto de vista del flujo vehicular colectivo (modelos macroscópicos). Además, debido al incremento de la capacidad computacional para resolver problemas de control de gran escala, las aplicaciones de modelos de flujo realísticos han llegado a ser posibles. Sin embargo, aún cuando la teoría del tránsito vehicular se entiende cada vez mejor y se caracteriza más fácilmente mediante tecnología de cómputo avanzada, los principios fundamentales del tránsito vehicular son tan importantes hoy, como en los primeros días. Ellos conforman la base de todas las teorías que se aplican en el diseño, operación y desarrollo de los sistemas de transporte avanzados.

En este capítulo, se presentará un resumen histórico de algunas teorías del tránsito vehicular, con el objeto de brindar al lector un panorama general. Para proporcionar al lector un mejor entendimiento del capítulo, antes de describir algunas de las diversas teorías existentes, primeramente se definirán algunos conceptos esenciales para el estudio y la modelación del tránsito vehicular.

1.2. Las variables fundamentales

El tránsito vehicular es un fenómeno complejo, por lo tanto, difícil de describir sin el uso de un conjunto de términos comunes. En los siguientes párrafos se introducirán algunos de estos términos, que se usarán como parte fundamental en las discusiones acerca del tránsito vehicular: las variables del tránsito vehicular.

Independientemente del enfoque de estudio, las variables fundamentales para el estudio del tránsito vehicular son tres: el flujo o volumen q , la velocidad v y la densidad ρ . En la realidad, existen dos formas de medir estas variables: promediadas en el espacio ó en forma puntual. Una descripción de las variables y su medición se proporcionará en esta sección.

1.2.1. El flujo

El *flujo vehicular* es tradicionalmente la cantidad más importante, debido a que es fácil de medir; además, de ser fundamental en la determinación del desempeño de un sistema de transporte como un todo. El flujo vehicular se define como el número de vehículos que pasan por un punto en un periodo de tiempo dado. Frecuentemente es útil dividir el flujo vehicular que se mide por el número

de carriles N_{lanes} . Se dice que si durante un tiempo T se han medido N_T vehículos, entonces el flujo vehicular se expresa como:

$$q_T = \frac{N_T}{TN_{lanes}} \quad (1.1)$$

La unidad típica del flujo es *número de vehículos por hora y carril*. Al flujo máximo posible se le denominará **capacidad**.

1.2.2. La velocidad

La *velocidad* vehicular se define como el cambio de posición de un vehículo por unidad de tiempo. Existen dos formas de medir la velocidad:

- La *velocidad promedio en el espacio*, que también se le llama *velocidad de viaje*. Esta velocidad resulta de promediar las velocidades de los N_L vehículos existentes sobre un segmento de la carretera de longitud L :

$$v_L = \frac{1}{N_L} \sum_{i=1}^{N_L} v_i \quad (1.2)$$

- La *velocidad puntual*, que también se le llama *velocidad instantánea*. Se obtiene de promediar las velocidades de todos los vehículos que pasan por una posición fija. Sea N_T es el número de vehículos que pasaron por una posición específica durante un periodo de tiempo T , entonces la velocidad puntual se expresa como:

$$\bar{v}_T = \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} v_i \quad (1.3)$$

Se puede notar inmediatamente, la diferencia entre la velocidad promedio espacial y la velocidad puntual, la velocidad promedio espacial incluye en el promedio vehículos con velocidad cero; mientras que la velocidad puntual no. Sin embargo, si todos los vehículos tienen siempre la misma velocidad, entonces ambas mediciones conducirán al mismo resultado.

En general, la velocidad v permite determinar el tiempo promedio, L/v , que un viajero necesitará para recorrer una distancia L . Además, es un cantidad relevante para las relaciones de las teorías basadas en la dinámica de fluidos (como se verá más adelante).

1.2.3. La densidad

La *densidad vehicular* promedio en el espacio, ρ_L , se define como el número de vehículos sobre un cierto segmento de la carretera, N_{veh} , dividido por la longitud del segmento L . Para permitir comparación, también es útil dividir por el número de carriles:

$$\rho_L = \frac{N_{veh}}{LN_{lanes}} \quad (1.4)$$

La densidad resultante es dada, por ejemplo, en "número de vehículos por km y carril".

A diferencia de la velocidad, la densidad puntual, ρ_T , no tiene medición natural. En su lugar, puede usarse $\rho_T = q_T/\bar{v}_T$.

Otro método alternativo para la densidad puntual es la fracción de tiempo que un sensor se ocupa por un vehículo, que también se le llama **ocupancia**. Desafortunadamente, esta cantidad es difícil de obtener de una simulación de tiempo discreto. Debido a que la duración que un sensor se ocupa por un vehículo con longitud l_i y velocidad v_i es l_i/v_i , la medición correcta en una simulación podría ser

$$\rho_T = \frac{1}{T} \sum l_i/v_i. \quad (1.5)$$

Sin embargo, en mediciones de campo, es usualmente imposible obtener la longitud l_i para cada vehículo, esto significa que una inferencia de la densidad a partir de la ocupancia es imposible.

Aún cuando el entendimiento de las variables fundamentales del tránsito vehicular es fundamental en la investigación del tránsito, se requiere el entendimiento de otros términos comunes en el contexto de tránsito vehicular. Por ejemplo, en el estudio de las diferentes teorías del flujo vehicular se debe tomar en cuenta el enfoque de estudio, este puede definirse desde la consideración del desempeño de los objetos individuales, hasta la consideración de un desempeño colectivo. Como un panorama general, en la siguiente sección se presentará una clasificación de los modelos del tránsito vehicular, con base en el enfoque de estudio. Además, se proporcionarán algunos conceptos, adicionales a los ya que ya se definieron, necesarios para la descripción e investigación de la teoría de tránsito vehicular.

1.3. Clasificación de los modelos

Las operaciones del tránsito en carreteras pueden mejorarse mediante la investigación de campo y la realización de experimentos en la vida real. Sin embargo, no sólo es esencial el problema de reproducir tales experimentos; los costos y la seguridad, juegan también un papel de vital importancia. Debido a la complejidad del sistema de tránsito vehicular, las aproximaciones analíticas pueden no proporcionar los resultados deseados o no ser posibles. Por lo tanto, los modelos computacionales diseñados para caracterizar el desempeño del complejo sistema del tránsito vehicular han llegado a ser una herramienta esencial en el análisis y experimentación del mismo. El reto de los investigadores del tránsito vehicular es buscar teorías y modelos útiles que tengan suficiente poder descriptivo, donde la suficiencia depende del propósito de aplicación de las teorías. Precisamente, en función del propósito de la aplicación es el enfoque de estudio que se utiliza. Los modelos pueden clasificarse en función del enfoque de estudio de acuerdo a lo siguiente:

- Características matemáticas de las variables independientes (continuos, discretos, semi-discretos);
- Nivel de detalle con el que se representa el sistema;
- Representación de los procesos (determinísticos, estocásticos);
- Tipo de operación (analítico, computacional);
- Escala de aplicación (redes, segmentos, ligas, intersecciones).

En particular, la clasificación de los modelos con base en el nivel de detalle, toma en cuenta la distinción de las entidades del tránsito y el nivel de descripción de estas entidades en los modelos de flujo respectivos. En particular, los modelos de simulación clasificados de esta forma pueden ser: *microscópicos*, *macroscópicos* y *mesoscópicos*. Esta sección proporcionará las características básicas de estos modelos de simulación.

1.3.1. Modelos microscópicos

Los modelos microscópicos describen tanto el desempeño espacio-temporal de las entidades del sistema, es decir, vehículos y conductores, como su interacción en un nivel de detalle alto (individualmente). Este tipo de modelos son adecuados para estudios donde el desempeño aleatorio puede representarse mediante técnicas probabilísticas (Gartner, et. al., 1987). Los modelos de este tipo, requieren generalmente un análisis estadístico cuidadoso para establecer sus resultados. Las características de las aproximaciones microscópicas suelen ser costosas, pero como beneficio las propiedades y la dinámica de los objetos pueden representarse en detalle.

1.3.2. Modelos macroscópicos

Por su parte, en los modelos de flujo macroscópico los procesos y la población se representan como un todo. Estos modelos describen el tránsito como un flujo en un nivel de agregación, sin distinguir sus partes constituyentes. Por ejemplo, el flujo vehicular se representa en una forma agregada mediante el flujo, la densidad y la velocidad. En un modelo macroscópico puede considerarse que el flujo se distribuye apropiadamente en los carriles de la carretera y puede emplearse una aproximación para este fin. Frecuentemente, los modelos de flujo macroscópico pueden clasificarse por una parte, de acuerdo al número de ecuaciones diferenciales parciales que frecuentemente consideran y por otra, de acuerdo al orden de las mismas. La dinámica de este tipo de modelos se describe en términos promedio, por ello, algunos modelos suelen ser eficientes para realizar cálculos en tiempo real. Dentro de este tipo de modelos se ubican los modelos continuos de tránsito vehicular, modelos para la selección de ruta óptima y algunos modelos para el estudio de formación de colas. Por lo tanto, se ubican los modelos que mediante los procesos de asignación tratan de traducir la demanda de transporte existente en un cierto territorio: país, región, ciudad, barrio, etc., representada por una matriz de viajes entre las zonas en que se ha dividido el territorio objeto de análisis, en cargas de

tráfico, que atiende (o atenderá) dicha movilidad. El proceso de asignación del flujo de estos modelos, se basa principalmente en la técnica que se denomina todo o nada, la asignación estocástica y la asignación dinámica. De esta forma, los análisis macroscópicos son adecuados para trabajos de diseño y optimización.

1.3.3. Modelos mesoscópicos

Existen teorías para los modelos con un nivel de detalle intermedio, entre los microscópicos y los macroscópicos, que se denominan *mesoscópicos*. Estos modelos son por lo general ad hoc y adoptan una descripción del estado con dinámica simplificada. Frecuentemente se basan en una combinación complementaria de análisis macroscópico. El desempeño de los conductores y los vehículos no se distingue, ni describe individualmente; más bien se realiza en términos agregados (por ejemplo, se usan funciones de distribución de probabilidad). Sin embargo, las reglas del desempeño se describen en un nivel individual. Para ello, el tránsito se representa por pequeños grupos de entidades del tránsito, las actividades y las intersecciones, las cuales se describen en un nivel de detalle bajo. Por ejemplo, una maniobra de cambio de carril puede representarse por un vehículo individual como un evento instantáneo, donde la decisión para desempeñar un cambio de carril se basa por ejemplo, en las densidades de carril relativas y la diferencia de velocidades. Algunos modelos mesoscópicos se construyen con analogía en la teoría de cinética de gases. Estos modelos dan resultados razonables acordes con el costo computacional (Gartner, et. al., 1987).

1.3.4. Fluctuaciones y estabilidad del flujo

Recientemente, términos como la metaestabilidad y las fluctuaciones del flujo, han atraído la atención de los investigadores del tránsito vehicular (Chowdury, et. al., 2000-(2); Nagel y Schreckenberg, 1992). Muchos modelos acerca del tránsito vehicular se enfocan en el estudio de los efectos causados por las fluctuaciones generadas en el flujo vehicular. Las fluctuaciones en el flujo vehicular se refieren a pequeñas perturbaciones que se pueden ocasionar en la estabilidad vehicular, por ejemplo, por la introducción o el paro total de un vehículo. En el contexto de tránsito vehicular, cuando el flujo vehicular es insensible a fluctuaciones se denomina flujo estable, es decir, cualquier alteración pequeña se absorbe y se retorna al estado inicial. Sin embargo, como se mostrará más adelante, el estudio del problema del tránsito vehicular ha permitido profundizar en el estudio de la metaestabilidad, es decir, diferentes estados que pueden generarse en dependencia de las condiciones existentes.

Las fluctuaciones del flujo vehicular pueden estudiarse sobre sistemas con condiciones de frontera periódicas y sistemas con condiciones de frontera abiertas. Un sistema con condiciones de frontera periódica, se define como una carretera con topología de anillo, donde los vehículos no pueden entrar y salir del sistema; por lo tanto, la densidad vehicular permanece constante en el tiempo. Mientras que, un sistema con condiciones de frontera abierta, será aquel cuya densidad promedio del sistema

se determinará por los vehículos que se permite entren o salgan en dos puntos determinados del sistemas (fronteras): semejante a una carretera con rampas de acceso y salida. El estudio de las fluctuaciones del flujo vehicular sobre estos sistemas permite determinar cuando un sistema cerrado (abierto) alcanza su *estado de equilibrio* (permanente). En el contexto de tránsito vehicular, el estado de equilibrio del tránsito vehicular de un sistema de anillo se referirá como el estado donde los parámetros macroscópicos del sistema, es decir, la densidad promedio, la velocidad y el flujo vehicular son homogéneos y estacionarios en el tiempo (del Río et al., 1988). Y se llamará un estado permanente de un sistema abierto (que mantiene sus condiciones de las fronteras en el tiempo), al estado que se obtiene cuando el cambio que se observa en los parámetros macroscópicos del tránsito vehicular, se considera despreciable sobre un periodo de tiempo arbitrariamente grande.

Con la definición de los diversos enfoques y conceptos básicos que se proporcionaron hasta este momento, es posible entonces presentar un panorama general algunos modelos y teorías existentes. En la siguiente sección, se presentará un resumen conciso de los últimos 70 años.

1.4. Teorías del tránsito vehicular: Antecedentes

Los primeros modelos de tránsito vehicular se basaban en propiedades colectivas del mismo, tal como la conservación del número de vehículos, la velocidad promedio y otras propiedades más complejas del flujo vehicular. La primera modelación de la teoría de tránsito vehicular se realizó con la finalidad de buscar relaciones independientes del tiempo entre ρ (densidad), v (velocidad) y q (flujo). A estas relaciones se conoce con el nombre genérico de *diagramas fundamentales*. Sin embargo, la forma de estas relaciones, todavía se discute en la literatura de flujo vehicular (Agyemang-Duah y Hall, 1991; Hall y Gunter, 1986). El problema parece ser el hecho de que las mediciones se efectúan bajo condiciones no estacionarias, es decir, donde el flujo varía constantemente en el tiempo.

El segundo paso de la teoría del tránsito vehicular fue introducir una dinámica, es decir, una descripción que depende del tiempo. Uno de los primeros intentos fue el trabajo de Lighthill y Whitham (Lighthill y Whitham, 1955). En este trabajo se introdujo una descripción que se basa en la ecuación de continuidad, junto con la suposición de que el flujo depende sólo de la densidad, es decir, no existe un tiempo de relajación, la velocidad se adapta instantáneamente a la densidad existente. Estos modelos macroscópicos permiten describir la evolución de la densidad y velocidad promedio de los vehículos en cada sección de la carretera.

Prigogine y Herman desarrollaron un modelo basado la teoría cinética para el flujo vehicular (Prigogine, 1971). Ellos obtuvieron el modelo de Lighthill y Whitham como un caso límite de la teoría cinética. La teoría cinética anticipa muchos de los fenómenos, pero probablemente debido a que las matemáticas para trabajar en este enfoque requieren una labor ardua y tienen un detalle excesivo, no se ha desarrollado ampliamente (Helbing y Treiber, 1998).

En 1971, Payne reemplazó la suposición de adaptación instantánea de la teoría de Lighthill-Whitham por una ecuación de inercia, que es similar a la ecuación de Navier-Stokes (Greenlee y

Payne, 1977; Payne, 1971). Kühne, en 1984 agregó un término de viscosidad y empezó a usar los métodos de dinámica no lineal para analizar las ecuaciones resultantes (Kühne, 1984). Estos modelos se usan ampliamente en algoritmos de control del tránsito vehicular en carreteras (Blinkin, 1976; Cremer y Papageorgiou, 1981; Looze, et. al., 1978; Papageorgiou y Mayr, 1982).

La teoría que se conoce como seguimiento de vehículos (car-following) considera el flujo desde un punto de vista microscópico: El desempeño de cada vehículo se modela con relación al vehículo de adelante. Los modelos de vehículo-siguiente examinan la manera en la cual los vehículos individuales (y sus conductores) se siguen uno al otro. En general se desarrollan a partir de una relación respuesta-estímulo, donde la respuesta de los conductores sucesivos en el flujo del tránsito es para acelerar o desacelerar, en proporción a la magnitud de los estímulos al tiempo t después de un periodo de tiempo T . La aceleración en algunos modelos de este tipo es de la forma

$$a(t + T) \propto \frac{v(t)^m}{[\Delta x(t)]^l} \Delta v(t)$$

donde v es la velocidad del vehículo en consideración; Δx es la distancia al vehículo de adelante, Δv la diferencia de velocidad a ese vehículo y m y l son constantes, T es un tiempo de espera entre estímulo y respuesta. Este tiempo considera todos los efectos de espera tal como el tiempo de reacción humana, el tiempo que el mecanismo de un vehículo necesita para reaccionar al estímulo, etc. Los primeros modelos microscópicos de este tipo conocidos se deben a Reuschel y Pipes (Pipes, 1953; Reuschel, 1950). Esta aproximación produjo resultados sobre la estabilidad de cadenas que se forman en el tránsito. Los modelos que se basan en esta perspectiva forman un puente entre el desempeño microscópico de los vehículos individuales y las características macroscópicas del flujo de un solo carril con sus correspondientes propiedades de flujo y estabilidad.

Recientemente, el continuo incremento que se registra en la demanda vehicular ha generado que se enfatice la atención en el mejoramiento de la eficiencia y capacidad de los sistemas de carretera. Las soluciones se orientan a mejorar el desempeño de los sistemas existentes. Para este propósito, se utilizan diversas tecnologías avanzadas de detección y localización, telecomunicaciones, electrónica, informática, sistemas de información geográfica y modelación. Por ejemplo, tecnologías para: la identificación y control de vehículos automatizados ¹; la advertencia de colisiones, la obtención de información del conductor y guía de rutas, el control y optimización de señales de tránsito avanzadas, la detección automática de accidentes y del espaciado automático de vehículos (tanto lateral como longitudinal). En conjunto, la finalidad es controlar los niveles de congestionamiento del tránsito, mejorar la seguridad vial, reducir la contaminación ambiental, proporcionar información al viajero de su entorno e incrementar la capacidad de la infraestructura de transporte.

No siempre es posible probar estas nuevas tecnologías avanzadas en el tránsito real, debido a los altos costos que esto implica. Sin embargo, es crítico contar con un pronóstico de los impactos

¹Vehículos que podrían operar en carreteras convencionales bajo control manual y sobre caminos instrumentados y dirigidos bajo control automático (Rillings, 1997)

de estas tecnologías en el desempeño vehicular antes de su implementación final. Las simulaciones de computadora han ganado gran importancia como un medio para evaluar las estrategias de manejo y control de los sistemas de tránsito y por lo tanto, ayudar a determinar el desempeño de alguna tecnología avanzada, en un tiempo muy corto (por ejemplo, ver (PATH; Eskafi et al., 1995; SIAS-Transport-Planners, 2002; Transport-Simulation-Systems, 2002)). En particular, las micro-simulaciones de tránsito son cada día más populares, debido a que permiten considerar aspectos dinámicos del tránsito y reproducir una gran variedad de fenómenos observados en el tránsito vehicular (por ejemplo, estados estables o inestables, caóticos, transiciones de fase, autorganizaciones críticas, etc).

Refiriéndose específicamente al control automático de vehículos, la investigación se enfoca actualmente sobre el desarrollo de controladores que podrían realizar automáticamente esta tarea. Ya en la feria mundial en 1939, la General Motors presentó conceptualmente una visión de carreteras automatizadas, donde los autos eran controlados longitudinalmente, dándole la libertad al conductor para realizar más actividades conforme se movía en las carreteras. Posteriormente, esto dió origen a la teoría llamada seguimiento del vehículo automatizado (automated car following). Muchos estudios se han realizado con base en la aplicación de esta teoría, puede considerarse que los tres estudios de investigación más sobresalientes en control de vehículos automatizados han sido: Un estudio de sistemas de carretera automática dirigido por General Motors de 1971 a 1981 (Bender, 1991); un programa sobre diversos aspectos de carreteras automatizadas dirigido en la Universidad del Estado de Ohio de 1964 a 1980 (Fenton y Mayhan, 1991) y el Programa sobre Tecnología Avanzada para Carreteras (PATH), que se empezó a desarrollar en la Universidad de California, Berkeley en 1976 y en la actualidad continúa (Shladover, et al., 1991). Sin embargo, los modelos microscópicos basados en la teoría del seguimiento de vehículos automatizados son abundantes en la literatura y pueden encontrarse referencias en la tesis de Swaroop (Swaroop, 1994). En lo referente al diseño de control del flujo vehicular para carreteras automatizadas, los nuevos modelos de control de flujo vehicular combinan las características macroscópicas del tránsito con las microscópicas (modelos mesoscópicos) y conceptos como los de la arquitectura utilizada por PATH con el control del flujo vehicular en más de un carril, lo que permite un estudio de la estabilidad del flujo vehicular (Álvarez, et al. 1999; Swaroop y Rajagopal, 1999), es decir, la evolución de la densidad y velocidad del tránsito con respecto al vehículo automatizado siguiente.

En la búsqueda de modelos de tránsito más eficientes que en el pasado, actualmente existe la tendencia a tomar la ventaja de los modelos que se han desarrollado en otras áreas de investigación como física, matemáticas y ciencias de la computación, para aplicarlos en micro-simulación del tránsito vehicular (Laboratory TRANSIMS, 2001; U.S. Department of Transportation, 1992). En este contexto, surgieron los modelos llamados modelos de **partícula saltando (particle hopping)** ó basados en Autómatas Celulares (AC), como un medio para evaluar el desempeño del flujo vehicular, con un costo computacional muy bajo.

Los autómatas celulares son entes matemáticos, dinámicos que pueden describir fenómenos de transporte. Diversas aplicaciones de los AC para la modelación de fenómenos físicos pueden encontrarse en (Burks, 1970; Perrier, et al., 1996; Smith, 1969; Toffoli, 1987). En estos modelos, el espacio es discreto y consiste de una red de celdas regulares, cada una de las cuales puede estar en un número finito de k estados. Los estados de todas las celdas se cambian al mismo tiempo, en pasos de tiempo discretos; el cambio obedece a un conjunto finito de reglas de interacción locales. El nuevo estado de una celda se determina mediante el estado actual de la celda en sí mismo y el de sus celdas vecinas. Esta interacción local permite capturar dinámicas de micro-nivel y propagarlas a un desempeño de macro-nivel. En el contexto de tránsito vehicular, puede imaginarse una carretera como un conjunto de celdas, donde cada una puede estar vacía o contener un vehículo. El movimiento de los vehículos tiene lugar mediante el salto de las partículas de un lugar a otro de acuerdo a reglas de movimiento. Desde el punto de vista del tránsito vehicular, es posible relacionar los estados de las celdas con cantidades significativas, tal como el tiempo de viaje, la velocidad vehicular, el flujo, etc (Nagel, 1996). Debido a su naturaleza discreta de espacio, tiempo y estado, los modelos de AC permiten cálculos muy rápidos en comparación con otros modelos basados en modelos continuos. Esta velocidad de cálculo puede ser una ventaja crítica cuando al simular redes de carretera se deseen que circulen miles de vehículos sobre esta. Por lo tanto, estos modelos combinan las ventajas de la compleja microsimulación, mientras permanecen eficientes computacionalmente. Esta combinación permite que los modelos de AC sean adecuados para simular operaciones de tránsito en redes de carretera, con el propósito de pronosticar el tránsito vehicular (Center for Parallel Computing, 1995; Laboratory TRANSIMS, 2001). Además, debido a que los modelos de AC describen procesos estocásticos, son por lo tanto, de interés general en el área de la física estadística (Chopard y Droz, 1998; Wolfram, 1986); ya que permiten observar fenómenos de no equilibrio, como las transiciones de fase del flujo vehicular (Schmittman y Zia, 1995). Algunas aplicaciones de AC al tránsito vehicular pueden encontrarse en (Chowdury, et al., 2000-(1); Nagel, 1996; Schadschneider y Schreckenberg, 1993).

Desde un punto de vista teórico, la metodología de los modelos de partícula saltando se sitúan entre la teorías de dinámica de fluidos y la teoría de seguimiento de vehículos (car following) y ayudan a esclarecer las conexiones entre estas aproximaciones. Los modelos basados en AC son inherentemente microscópicos, lo que permite adicionar propiedades de cada vehículo como la identidad de los viajeros, plan de ruta (Nagel, 1996), de acuerdo a las políticas de evaluación de los procesos.

Como dato histórico, Gerlough (Gerlough, 1956) realizó la primera propuesta de modelos de AC para tránsito vehicular, propuesta que posteriormente Cremer y sus colaboradores extendieron (Cremer y Ludwig, 1986). Sin embargo, estos modelos no tenían un desempeño computacional eficiente. Fue hasta 1992, cuando los alemanes Kai Nagel y Michael Schreckenberg introdujeron un modelo simple de ACs probabilista, donde una de las reglas de iteración presenta influencia aleatoria

(Nagel y Schreckenberg, 1992). Actualmente, la metodología que se basa en AC como una opción de alta velocidad, ya se ha usado con éxito en proyectos de simulación del tránsito en Alemania (Center for Parallel Computing, 1995) y en los Estados Unidos (Smith, et al., 1995).

En resumen, la necesidad de generar nuevos modelos que permitan aclarar los impactos de las diferentes estrategias de conducción, automatizada, manual y mixta, en el desempeño del tránsito vehicular se incrementa constantemente. En este sentido, los modelos para simulación del tránsito vehicular son un medio para representar la amplia variedad de fenómenos observados en el flujo vehicular, guiándose hacia un entendimiento cualitativo de los principios básicos. Estos nuevos modelos para simulación deben ser capaces de integrar la anticipación con la seguridad, para lograr el máximo incremento de la capacidad vehicular, con la mínima variación de velocidades (principal causa de accidentes). Sin embargo, las simulaciones prácticas deben establecer una relación entre resolución, fidelidad y escala, es decir, el nivel de detalle de los objetos, el grado de realismo de cada entidad y el tamaño del problema.

Debido a la simplicidad que se ha mostrado presentan los autómatas celulares para simular el tránsito vehicular y en la búsqueda de proponer un modelo que permita analizar los impactos de algunas estrategias de conducción anticipada en el tránsito vehicular, en el siguiente capítulo se presentará un modelo nuevo de AC. Cabe mencionar que el modelo es una modificación del modelo NaSch y una extensión del modelo propuesto en (Lárraga, 2001).

Capítulo 2

Un modelo con anticipación variable

2.1. Introducción

Recientemente, los modelos de tránsito vehicular con autómatas celulares han mostrado ser capaces de capturar las características básicas que se observan en el tránsito vehicular. Como ya se mencionó, en estos modelos los vehículos obedecen un conjunto reducido de reglas de interacción, que se aplican a todos los vehículos. Sin embargo, ¿Cómo se simulan las diversas situaciones de tránsito mediante AC?

Los modelos de tránsito vehicular con autómatas celulares se clasifican de acuerdo a las condiciones de frontera que se consideran y a la dinámica que se utiliza en la simulación. Las condiciones de frontera se refieren a la topología que se utilizará para simular el tránsito vehicular, misma que se define con base en la situación que se desee reproducir. Las condiciones de frontera más comunes son: las condiciones de frontera periódica y las condiciones de frontera abierta. Las condiciones de frontera periódica se aplican cuando se modela una carretera como una topología de anillo, es decir, donde la densidad vehicular promedio se mantiene en el tiempo. Mientras que la consideración de fronteras abiertas corresponde a situaciones del tránsito sobre segmentos de carretera, donde los flujos de entrada y de salida en los extremos del segmento bajo consideración, determinan la densidad promedio del sistema (por ejemplo, un segmento de carretera entre una rampa de acceso y una rampa de salida).

Por otra parte, la dinámica se refiere a la forma de aplicar las reglas del modelo a los elementos del AC. Básicamente se distinguen cuatro tipos de dinámicas. Cuando las posiciones y velocidades de los vehículos (variables dinámicas) pueden cambiarse una después de otra en un cierto orden (cambio secuencial), una después de otra en orden aleatorio (secuencial aleatorio), en paralelo para todos los sitios de una subred dada (cambio de subred) ó en paralelo para todos los sitios (cambio paralelo). En el caso de la dinámica secuencial se distinguen dos casos: cambio en la dirección del movimiento del tránsito u opuesto a ésta. Para condiciones de frontera abierta, nótese que la dinámica secuencial y la paralela son semejantes si la dirección en que se realiza el cambio secuencial es la misma que la dirección del tránsito vehicular. Sin embargo, para sistemas con condiciones de frontera periódica esto no es así; aquí, la dinámica paralela corresponde a una dinámica secuencial

con un sitio especial, el cual cierra el anillo (la posición más a la derecha).

El primer modelo basado en AC que mostró las bondades de los autómatas celulares para la simulación del tránsito vehicular fue el modelo NaSch (ver (Nagel y Schreckenberg, 1992)). En este modelo las condiciones de frontera que se utilizan son periódicas y el cambio de estado se realiza con dinámica paralela. Diversas modificaciones al modelo NaSch, con la finalidad de mejorar el desempeño del mismo, pueden encontrarse en (Chowdury, et al., 2000-(1)). Como se verá más adelante, en este modelo no se consideran efectos de anticipación (consideración de la velocidad del vehículo precedente) en el proceso de desaceleración vehicular. Cabe mencionar que, la mayoría de los modelos de segundo orden, con analogía hidrodinámica, consideran términos de anticipación en la determinación de la velocidad. En el contexto de los modelos de AC, existen modelos que incorporan el término anticipación en su proceso de desaceleración, sin embargo, ninguno es capaz de considerar diferentes estrategias de conducción anticipada (Knospe, et al., 1999; Knospe, et al., 2000; Li y Riang, 2001; Knospe, et al., 2002; Wagner, et al., 1997).

En este capítulo, se presentará un nuevo modelo probabilista de AC para un solo carril. Este modelo modifica el proceso de desaceleración del modelo NaSch para considerar diferentes intensidades de anticipación (estimación de la velocidad de los vehículos precedentes) y preservar seguridad en la carretera. Para este propósito se incluye un parámetro en el proceso de desaceleración. Se mostrará que mediante una variación adecuada de este parámetro de anticipación, es posible considerar diferentes situaciones del tránsito vehicular manual, automatizado y mixto. Debido a la consideración de la anticipación, el modelo también requiere que el orden de interacción de las reglas del modelo NaSch se cambie, con la finalidad de capturar mejor las reacciones de los conductores ante el tránsito existente y reproducir diversos fenómenos que ocurren en el tránsito real.

Para permitir un mejor entendimiento del modelo que se propone en este trabajo, en la primera sección se describirá brevemente el modelo NaSch.

2.2. El modelo de Nagel-Schreckenberg

Los hechos empíricos más simples que todo modelo de tránsito vehicular debe reproducir son la formación espontánea de estancamientos y la forma característica de la relación flujo-densidad, es decir, el llamado *diagrama fundamental*. Como se mostrará más adelante, el modelo NaSch puede reproducir en forma cualitativa el diagrama fundamental, pero no considera efectos de anticipación en el proceso de desaceleración.

El modelo NaSch consiste de N vehículos moviéndose en una sola dirección sobre una red unidimensional de L celdas con condiciones de frontera periódicas. La longitud típica de una celda (Δx) es alrededor de $7.5m$. Esta corresponde al espacio típico (longitud de un vehículo más la distancia al vehículo precedente) ocupado por vehículo en un estancamiento. Cada celda puede estar vacía u ocupada por exactamente un vehículo que viaja con una velocidad discreta v que toma valores $v = 0, \dots, v_{max}$. Aquí, v_{max} corresponde a la velocidad límite y en el caso más simple es la

misma para todos los vehículos.

Un paso de tiempo discreto (Δt) corresponde a un segundo, por lo tanto, las transiciones de cambio del sistema son de $t \rightarrow t + 1$. De esta forma, si se consideran los valores de Δx y Δt , $v = 1$ corresponde a mover un vehículo a la celda vecina (en la dirección del flujo) y corresponde a 27 Km/h en unidades reales. La velocidad máxima usada es $v_{max} = 5$, que es equivalente a 135 Km/h .

En el contexto de los autómatas celulares, debido a la discretización de espacio y tiempo, las unidades propias se omiten frecuentemente. Por lo tanto, las unidades apropiadas para el modelo serían: $[d]$ = número de celdas, $[v]$ = número de celdas por paso de tiempo, $[t]$ = número de pasos de tiempo, etc. Por esa razón, la expresión $v < d$ es usada frecuentemente en lugar de $v < d/\Delta t$, porque $\Delta t = 1$.

Sean v_i y x_i la velocidad actual y posición del un vehículo i , respectivamente y sea x_p la posición del vehículo de adelante (que precede al vehículo i), en un tiempo dado. Así, $d_i := x_p - x_i - 1$ denota la distancia (número de celdas vacías) enfrente del vehículo en la posición x_i .

La transición de estado en cada paso de tiempo $t \rightarrow t + 1$, es decir, el cambio de velocidad y posición de los vehículos, se define con el siguiente conjunto de reglas:

R1: Aceleración

Si $v_i < v_{max}$, la velocidad del vehículo i se incrementa en uno, es decir,

$$v_i \rightarrow \min(v_i + 1, v_{max}).$$

R2: Desaceleración

Si $d_i < v_i$, la velocidad del vehículo i se reduce a d_i .

Por lo tanto, la nueva velocidad del vehículo i es

$$v_i \rightarrow \min(v_i, d_i).$$

R3: Frenado aleatorio

Si $v_i > 0$, la velocidad del vehículo i se decrementa aleatoriamente con probabilidad R por una unidad, es decir,

$$v_i \rightarrow \max(v_i - 1, 0) \quad \text{con probabilidad } R.$$

R4: Movimiento del vehículo

Cada vehículo se mueve hacia adelante de acuerdo a su nueva velocidad determinada en los pasos 1-3, es decir,

$$x_i \rightarrow x_i + v_i$$

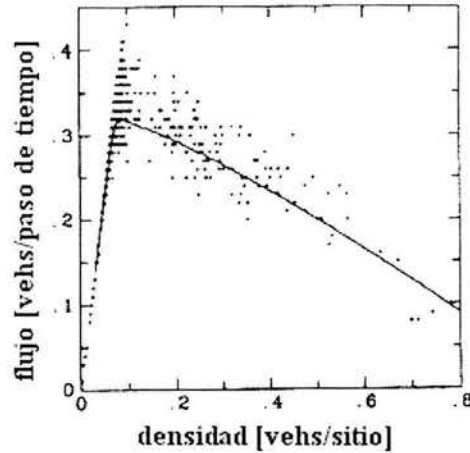


Figura 2.1: Flujo del tránsito (en vehículos por paso de tiempo), con respecto a la densidad (en vehículos por sitio) resultado de simulaciones del modelo NaSch (10^4 celdas). Los puntos son promedios sobre 100 pasos de tiempo y la línea sobre 10^6 pasos de tiempo

Estas reglas se aplican a todos los N vehículos del sistema mediante una dinámica paralela. Para el caso de un carril, estas reglas garantizan que no se producen alcances entre los vehículos y que el orden se mantiene.

El modelo NaSch es un modelo mínimo, en el sentido que las cuatro reglas son necesarias para reproducir las características básicas del tránsito real; sin embargo, se requieren reglas adicionales para capturar situaciones más complejas (Knospe, et al., 1999; Li y Riang, 2001). La regla $R1$ refleja la tendencia general de los conductores a conducir tan rápido como sea posible sin exceder la velocidad máxima límite. La regla $R2$ es para evitar colisiones entre los vehículos. El frenado aleatorio, en la regla $R3$, toma en cuenta los diferentes patrones de desempeño de los conductores individuales, especialmente, la aceleración no determinista; esto es crucialmente importante para la formación espontánea de congestionamientos. Es importante mencionar que un cambio en el orden las reglas de transición definiría las propiedades del modelo; en otras palabras, las reglas no conmutan.

Los parámetros del modelo son: la velocidad máxima $v_{\text{máx}}$, el parámetro de frenado R y la densidad global ρ .

2.2.1. El diagrama fundamental del modelo NaSch

En primera instancia, la modelación del tránsito vehicular con AC parece una aproximación cruda de la realidad. ¿Se puede esperar realismo de la modelación con AC? Como primera respuesta a esta pregunta, Nagel graficó la relación del flujo con respecto a la densidad mediante datos agregados obtenidos de simulación; que se muestra en la Figura 2.1. Esta figura indica que el modelo NaSch

reproduce cualitativamente la forma de esta relación: en densidades bajas el flujo se incrementa en función de la densidad hasta que un máximo se alcanza (flujo libre); posteriormente un incremento de la densidad implica un decremento del flujo vehicular (flujo congestionado). Sin embargo, una comparación cuantitativa de los resultados de simulación, con mediciones tránsito en carreteras de Alemania, indica que los valores resultantes de simulación son más bajos en un factor de dos (ver (Nagel y Schreckenberg, 1992)). A pesar de ello, la simplicidad del modelo NaSch mostró que los modelos basados en AC son modelos adecuados para modelar el desempeño individual de los vehículos y redes viales con una velocidad computacional alta.

El modelo NaSch no permite simular, por ejemplo, diferentes políticas de espaciamiento vehicular, ni estados metaestables y sincronizados. En la siguiente sección se presentará un nuevo modelo que es una modificación del modelo NaSch para simular diferentes estrategias de conducción, que requieren una distancia segura dependiente de la velocidad del vehículo precedente.

2.3. Un nuevo modelo de un solo carril

En el modelo que se definirá en esta sección, se modifica el proceso de desaceleración del modelo NaSch para considerar diferentes intensidades de la estimación de la velocidad de los vehículos precedentes. Como resultado, se incluye un nuevo parámetro en el modelo, que aquí se le denominará *parámetro de anticipación*. Este parámetro tiene como función principal determinar el grado de agresividad de los conductores. Sin embargo, también se puede relacionar a otros parámetros de análisis de seguridad, como aquellos que se usan en (Álvarez y Horowitz, 1999; Godbole y Lygeros, 1994), para Sistemas de Carretera Automatizados (SCA). Por lo tanto, la adición del parámetro de anticipación permite que el modelo describa diferentes situaciones de tránsito automatizado, manual y mixto. Aunque es posible aplicar el modelo de AC a sistemas de multicarril, en esta sección sólo se presentará el modelo y el su correspondiente análisis para el caso de sistemas con un solo carril, con una topología de anillo (en otros capítulos se analizará el caso multicarril). Cabe mencionar, que este tipo de modelaciones con fronteras cerradas han sido usadas por otros autores, como (Li y Shrivastava, 2002), para analizar la estabilidad del tránsito vehicular. La meta será mostrar la capacidad del modelo para capturar las características básicas del tránsito vehicular.

2.3.1. Definición del modelo

El modelo consiste de N vehículos que se mueven en una sola dirección sobre una red unidimensional de L celdas. Cada instante de tiempo dado, una celda puede estar vacía u ocupada por un vehículo que viaja con una velocidad discreta v . Todos los vehículos tienen una velocidad discreta, que varía de $0, \dots, v_{max}$. Esta velocidad límite puede ser diferente dependiendo del tipo de vehículo bajo consideración: camionetas, coches, etc. Sin embargo, en esta sección la velocidad máxima será la misma para todos los vehículos ($v_{max} = 5$). Por simplicidad y como punto inicial

de la investigación, sólo se considerará un solo tipo de vehículo (aún cuando en la realidad circulan vehículos heterogéneos).

La velocidad discreta, que corresponde a uno de los estados de los vehículos en este AC, se relaciona con el número de celdas que un vehículo avanza en un paso de tiempo. El otro estado, la posición, se relaciona con la celda que cada vehículo ocupa.

Al igual que para el modelo NaSch, la longitud típica de una celda (Δt) es de 7.5 m y se interpreta como la longitud de un vehículo más la distancia entre vehículos en un congestionamiento; sin embargo, puede ajustarse de acuerdo al problema bajo consideración. Un paso de tiempo (Δt) se toma como un segundo, por lo tanto las transiciones son de $t \rightarrow t + 1$. Este paso de tiempo es del orden del tiempo de reacción humano. También puede ser fácilmente modificado. Con estos valores de Δx y Δt , $v = 1$ corresponde a mover de una celda a la celda vecina hacia adelante y significa 27 km/h en unidades reales. La velocidad máxima es seleccionada como $v_{max} = 5$, que es equivalente a 135 km/h.

Sean v_i y x_i la velocidad actual y la posición del vehículo i , respectivamente y sean v_p y x_p , la velocidad y la posición del vehículo de adelante (vehículo precedente), en un tiempo dado; $d_i := x_p - x_i - 1$ denota la distancia (número de celdas vacías) enfrente del vehículo en la posición x_i , que algunas veces se llama "headway".

La dinámica del modelo con anticipación se define por el siguiente conjunto de reglas, que se aplican a todos los N vehículos cada paso de tiempo:

R1: Aceleración

Si $v_i < v_{max}$, la velocidad del vehículo i se incrementa en uno, es decir,

$$v_i \rightarrow \min(v_i + 1, v_{max}).$$

R2: Frenado aleatorio

Si $v_i > 0$, la velocidad del vehículo i se decrementa aleatoriamente con probabilidad R por una unidad. es decir,

$$v_i \rightarrow \max(v_i - 1, 0) \quad \text{con probabilidad } R.$$

R3: Desaceleración

Sea

$$d_i^s = d_i + \left[(1 - \alpha) \cdot v_p + \frac{1}{2} \right],$$

la distancia de seguridad del vehículo i a su vehículo precedente, donde el parámetro de anticipación $0 \leq \alpha \leq 1$ determina esta distancia, que depende de la velocidad de vehículo precedente. $[x]$ denota la parte entera de x , es decir, $[x + \frac{1}{2}]$ corresponde a redondear x al próximo valor entero.

Si $d_i^s < v_i$, la velocidad del vehículo i se reduce a d_i^s . Por lo tanto, la nueva velocidad del vehículo i es

$$v_i \rightarrow \min(v_i, d_i^s).$$

R4: Movimiento del vehículo

Cada vehículo se mueve hacia adelante de acuerdo a su nueva velocidad determinada en los pasos 1-3, es decir,

$$x_i \rightarrow x_i + v_i.$$

De la misma manera que en el modelo NaSch, las reglas $R1$, $R2$ y $R3$ se designan para cambiar la velocidad de los vehículos; la regla $R4$ cambia la posición. De acuerdo a esto, el cambio de estado se divide en dos etapas, primero la velocidad, segundo la posición. Note que esta división sigue el esquema en la integración numérica de las ecuaciones diferenciales, que primero cambian la derivada con respecto al tiempo y después el valor del estado. Este modelo de AC también es mínimo, en el sentido que se requieren las cuatro reglas para reproducir las características básicas del tránsito real.

De la definición del modelo, los parámetros a considerar son los siguientes: la velocidad límite v_{max} , el parámetro de frenado aleatorio R , la densidad global $\rho = N/L$ y el parámetro de anticipación α .

La regla $R3$ es la principal modificación que se realizó al modelo NaSch. En esta regla se incorpora el conocimiento de la velocidad del vehículo precedente a través del parámetro de anticipación α , cuyo rango de variación es $0 \leq \alpha \leq 1$. Primeramente, se nota que la regla de desaceleración del modelo NaSch se recupera con el valor $\alpha = 1$. Por lo tanto, la regla $S3$ puede verse como una generalización de la regla de desaceleración del modelo NaSch. La regla de desaceleración del modelo NaSch puede generar desaceleraciones muy grandes, que por ejemplo, pueden evitarse si se ajusta el parámetro de anticipación α . Por otra parte, hay escenarios donde los vehículos no requieren mantener una separación de los vehículos de enfrente. Por ejemplo, este es el caso en los esquemas de pelotón (Swaroop y Hedrick, 1996; Varaiya, 1993), que aceptan valores de α más cercanos a cero ¹. El parámetro de anticipación α , puede relacionarse con el grado de agresividad de los conductores y por lo tanto, con la distancia segura entre vehículos (α más cercano a cero implica que el conductor es más agresivo (Lárraga, 2001; Lárraga, et al, 2002)); aunque también puede relacionarse con el grado de automatización de la carretera (con niveles altos de anticipación que permite espacios pequeños entre los vehículos, que viajan con velocidades altas (Rillings, 1997)). Con valores intermedios de α pueden representarse diferentes políticas de espaciamiento seguras o intensidades de anticipación o agresividad de los conductores. Para las carreteras normales, donde los niveles de anticipación son bajos, los valores de α son más cercanos a uno y pueden ajustarse para representar valores de desaceleración factibles.

¹Sin embargo, hay requisitos adicionales para preservar seguridad, como el frenado coordinado (Álvarez y Horowitz, 1999; Choi y Swaroop, 2001)

Nótese que la cantidad $[(1 - \alpha) \cdot v_p + 1/2]$ en la regla *S3*, puede verse como una distancia segura, que se adiciona a d_i . Esta distancia permite que la desaceleración de los vehículos tome más de un paso de tiempo. El valor de α puede colocarse dependiendo del espacio, que trata de representar, por ejemplo, sitios con cambio de topología o curvas.

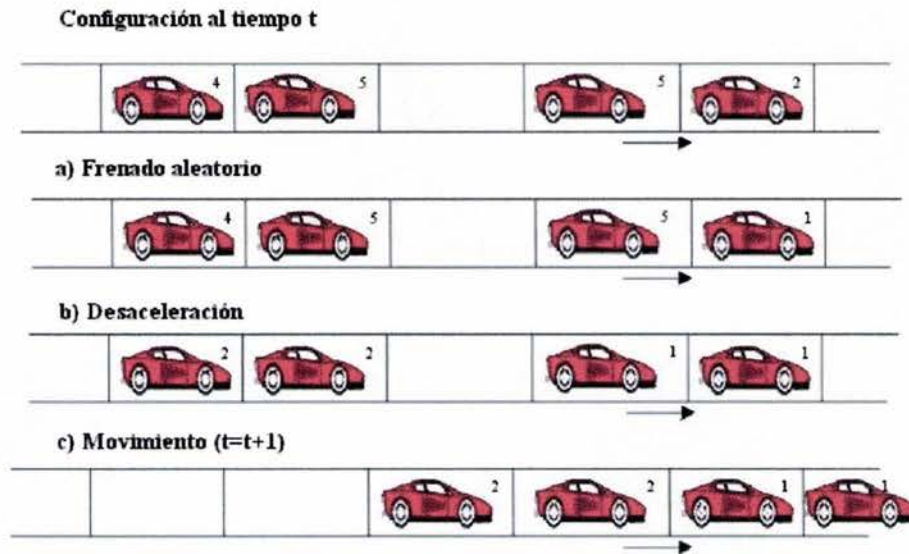


Figura 2.2: Ejemplo paso a paso de la aplicación de las reglas del modelo de AC modificado para $\alpha = 0$, cada número asignado a un vehículo significa su velocidad actual. Se consideró $v_{max}=5$ y $R = \frac{1}{3}$. Lo que significa que una tercera parte de los vehículos bajan su velocidad durante el proceso de frenado aleatorio.

Hay un precio que pagar con esta modificación, que limita los valores de la desaceleración. Este podría ser el caso de que la desaceleración de un vehículo implique desaceleraciones de los vehículos de atrás, que también limitarían la capacidad de desaceleración. El escenario más crítico podría representarse mediante una cadena de vehículos, donde cada uno de ellos viaja con una velocidad máxima y con el primer vehículo (el de más adelante) dándole alcance a un vehículo estacionado. Para colocar consistentemente las velocidades de todos los vehículos en la cadena, donde cada uno de ellos hace uso de la desaceleración máxima permitida, si se supone que la velocidad se decrementa en uno de un vehículo a otro en la cadena, *R3* se debe iterar v_{max} veces.

Otra modificación relevante con respecto al modelo NaSch es el cambio en el orden de aplicación de las reglas de la desaceleración y el frenado aleatorio. En el modelo NaSch, el frenado aleatorio se aplica después de la desaceleración, mientras que en el modelo que aquí se propone, el frenado

aleatorio se aplica primero y la desaceleración después. Este cambio se realizó tomando en cuenta que una regla que se relaciona con la seguridad, como la regla $R3$ del modelo modificado, debe ser la última regla que se aplique en el cambio de las velocidades. Esto corresponde con las reacciones normales del conductor ante situaciones que demandan reducir la velocidad y que conllevarán a alguna otra reacción. Si el frenado aleatorio se aplicara después de desacelerar los vehículos (como en el modelo NaSch), una desaceleración adicional produciría inconsistencia en las velocidades. Por lo tanto, en principio, en el modelo propuesto la regla $R2$ se diseñó para modelar el desempeño espontáneo de los conductores. Sin embargo, se debe notar que aún cuando la regla $R2$ produce desaceleración, ésta no evita la regla de desaceleración $R3$ para requerir frenado adicional. De esta manera, la sobreacción mientras se frena puede todavía modelarse. La desaceleración ilimitada disponible en el modelo NaSch produce que este orden de aplicación no sea relevante para ese modelo.

Como ilustración del desempeño del modelo modificado, en la Figura 2.2 se presenta un ejemplo de la dinámica del mismo, para un valor de $\alpha = 0$, $R = 1/3$ y $v_{max} = 5$. Se supone una sección intermedia del sistema. Primeramente, se ilustra una configuración del AC al tiempo t , obtenida al aplicar la regla $R1$. Posteriormente, supóngase que al aplicar la regla $R2$, con $R = 1/3$, el vehículo de enfrente baja su velocidad en una unidad. Este frenado aleatorio del vehículo de enfrente produce que todos los vehículos de atrás también desaceleren, es decir, limita la capacidad de desacelerado (regla $R3$). Por lo tanto, se genera un congestionamiento; estado que se observa después de que los vehículos se movieron. Sin la consideración de la velocidad de los vehículos precedentes, como en el modelo NaSch, el estado final resultaría en un estancamiento vehicular ($v = 0$), debido a que los vehículos 1 y 3 (de izquierda a derecha) se hubieran estacionado totalmente, sin importar si la velocidad del vehículo de adelante les permite avanzar.

El ejemplo anterior indica la importancia de considerar la anticipación en el proceso de desaceleración para lograr flujos más eficientes y que se asemejen más al comportamiento real. De hecho, en situaciones reales, los conductores siempre estiman la velocidad del vehículo precedente y de acuerdo a esto, y a su forma de conducir (agresiva o precavida), seleccionan una distancia segura para conducir.

En la siguiente sección se presentarán resultados de simulación que se obtuvieron para el modelo que aquí se presenta.

2.4. Resultados de simulación

Una parte integral de la investigación sobre el modelo fueron las simulaciones de computadora. Las simulaciones permiten comparar cuantitativamente un modelo con resultados de mediciones, en un tiempo relativamente corto. De esta forma, complementan el trabajo analítico. En principio, las simulaciones se usan como un medio para probar una variedad de modelos hasta que se obtiene un resumen y se encuentra lo más útil. Los datos que se obtienen de simulaciones se usan para

confirmar resultados analíticos y para ir más allá de los casos que se tratan analíticamente: para variaciones/extensiones del modelo o para cantidades y ediciones más complejas. Los resultados que se presentarán en esta sección son los primeros pasos hacia el entendimiento de un modelo de microsimulación para usarse en redes de tránsito.

Para simular el modelo de AC de la sección previa, se usa un sistema lineal con topología de anillo, de un solo carril, con $L = 10^4$ celdas. Entonces, el número de vehículos iniciales se conserva en el tiempo y por lo tanto, la densidad promedio es constante.

El estado inicial del sistema se genera colocando en forma aleatoria a N vehículos sobre el carril, con una velocidad inicial que toma un valor discreto aleatorio entre 0 y v_{max} . Se tratan diferentes valores de N , R y α . Las velocidad y posición de los vehículos se cambia de acuerdo con las reglas del modelo. Para cada simulación, se establece un valor para el parámetro α , con base a la intensidad de anticipación que se desee y de esta forma, se controla la distancia segura entre los vehículos. Por ejemplo, $\alpha = 0$ equivale a tomar en cuenta la distancia entre dos vehículos y la velocidad exacta del vehículo de adelante, es decir, permite que un vehículo puede estar detrás de otro con la misma velocidad, sin la existencia de una distancia segura entre ellos para prevenir accidentes (sólo la distancia que se incluye en el tamaño de la celda). En lo siguiente, el valor de α es el mismo para todos los vehículos, es decir, consideramos conductores homogéneos en α .

Todos los datos de simulación que se presentan se han generado mediante simulaciones de $L = 10^4$ y $T = 15 * L$ pasos de tiempo. Para el análisis de los resultados, los primeros $10 * L$ pasos de tiempo (que llamamos T_e) de la simulación se descartan para permitir que el sistema alcance su estado de equilibrio, es decir, el estado en el que los valores macroscópicos de las variables del sistema no cambian en el tiempo. Entonces, cada paso de tiempo se miden las variables principales, la velocidad puntual, la ocupancia, el flujo y la varianza de velocidad de los vehículos (que describiremos más adelante). Así, los datos de simulación finales son resultado de un promedio sobre $5 * L$ pasos de tiempo.

2.4.1. Comparación con el tránsito real manual

El diagrama fundamental es uno de los criterios más importantes para mostrar que el modelo reproduce el desempeño del tránsito vehicular. Este diagrama caracteriza la dependencia de por ejemplo, el flujo sobre la densidad. Como punto inicial de la investigación se decidió estudiar el caso de tránsito manual, es decir, con valores de α cercanos a uno. Cabe mencionar que, para poder aproximar los resultados obtenidos con datos de mediciones, se realizó una simulación exhaustiva con diferentes valores de los parámetros para así, poder determinar los valores adecuados de los parámetros para simular el tránsito. Los datos de mediciones corresponden a una carretera en Canadá, en México no existe información de este tipo; sin embargo, con la comparación se pretende mostrar que el modelo puede reproducir el comportamiento del tránsito real y los parámetros pueden calibrarse con base en las características del tránsito que se desee modelar.

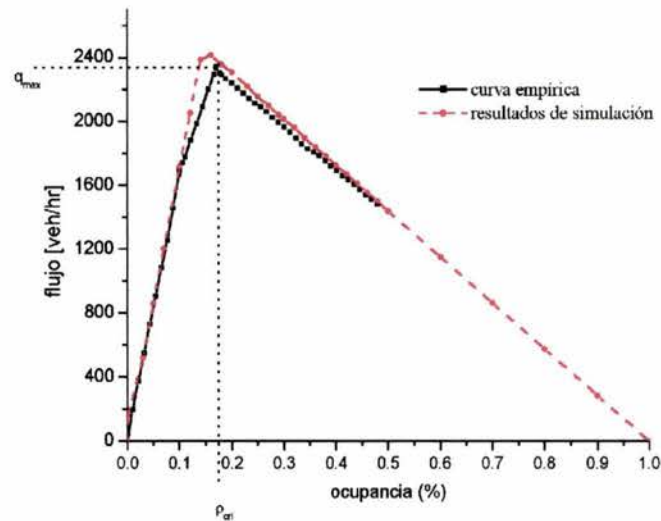


Figura 2.3: Forma característica de un diagrama fundamental empírico tomado de una carretera en Canadá (datos tomados de Hall y Gunter (1986), línea sólida) en comparación con la curva correspondiente a simulaciones del modelo propuesto para $R = 0.2$ y $\alpha = 0.75$ (línea punteada). Cada punto corresponde a una densidad fija.

Por lo tanto, se obtuvo un diagrama fundamental de datos agregados del nuevo modelo con valores de $R = 0.2$ y $\alpha = 0.75$, que se muestra en la Figura 2.3. En esta figura, cada punto corresponde a una densidad fija. Los puntos se obtienen de simulaciones mediante la variación de la densidad entre 0.01 y 0.99, en incrementos de 0.01. Observe que este valor de α corresponde a una estimación cautelosa de la velocidad de los vehículos precedentes, es decir, a establecer una distancia de seguridad grande.

Como puede observarse en la Figura 2.3, la curva del modelo (línea punteada) es consistente con la curva característica del diagrama fundamental empírico (línea sólida) tomada de Hall y Gunter, (1986). En esta gráfica se indican q_{max} y ρ_{crit} , el flujo máximo (capacidad) y su correspondiente ocupancia crítica donde este ocurre, respectivamente. Los resultados del modelo son muy alentadores. Nótese la buena correspondencia cuantitativa entre los datos de simulación y los datos empíricos, en la parte de decremento del diagrama fundamental (donde los congestionamientos se hacen presentes). Además, los valores correspondientes al flujo máximo y ocupancia crítica resultantes del modelo, $(\rho_c, q_{max}) = (16\%, 2417 \text{ veh/h})$, son muy cercanos a los correspondientes a la curva empírica $(\rho_c, q_{max}) = (17\%, 2340 \text{ veh/h})$ ². Por lo tanto, esta comparación indica que el modelo es capaz de reproducir la forma característica del diagrama fundamental del tránsito vehicular manual. Además, una comparación de los resultados del nuevo modelo con los obtenidos mediante

²Debe considerar que este flujo máximo, no corresponde al flujo máximo de las carreteras mexicanas

otros modelos existentes basados en AC, indica una clara mejoría en la aproximación cuantitativa a datos empíricos, ver el diagrama fundamental en Li y Rang (2001). Esto es un indicador de que en el tránsito real, la distancia de seguridad se debe determinar en función de las velocidades de los vehículos, como es el caso del modelo que aquí presenta.

Por otra parte, durante el incremento del flujo, una segunda pendiente positiva se observa en la curva empírica, la cual no se reproduce por el modelo tal y como se definió en la sección 2.3.1. Con el propósito de estimar cuantitativamente bien la curva empírica, se realizó una pequeña modificación adicional en el proceso de desaceleración. Esta pequeña modificación, permitió reproducir los datos muy bien y no incrementa la complejidad del modelo. Sin embargo, debido a que los resultados que se presentarán a lo largo de este trabajo corresponden al modelo descrito en la sección 2.3.1, los resultados de esta modificación se presentarán en un apéndice, con la finalidad de no confundir al lector (ver apéndice 2).

En esta subsección se mostró que el modelo puede reproducir algunas características comunes del tránsito vehicular manual. Sin embargo, como ya se mencionó, la adición del parámetro α permite considerar diversas estrategias de conducción anticipada y así, ir más allá de análisis resultantes de modelos previos. Esto se mostrará en la siguiente subsección.

2.4.2. Modelación con anticipación variable

Mediante el uso del modelo propuesto, se investigó el desempeño del flujo vehicular para diferentes valores del parámetro α . Como ya se mencionó, el parámetro α representa la forma en la cual diferentes estrategias de conducción adoptan una política de espaciamiento segura o una intensidad de anticipación en los vehículos. En la Figura 2.4, se muestra el diagrama fundamental resultante del modelo con un valor fijo de $R = 0.2$ y diferentes valores del parámetro de conducción anticipada α . Se seleccionó $R = 0.2$, ya que para este valor se mostró que se reproducen muy bien los datos reales; sin embargo, también se realizaron simulaciones con diferentes valores del parámetro R .

Note que cada curva incluye múltiples valores del parámetro α . Con ello se desea mostrar los efectos del redondeo que se definió en el proceso de desaceleración del modelo (en la regla R3), en la estimación de la velocidad del vehículo precedente: $[(1 - \alpha) \cdot v_p + \frac{1}{2}]$ (ocasionado por la discretización en los AC). Para ejemplificar este efecto considere el caso en que α toma valores en el rango entre 0 y 0.12; sin importar el valor de α , siempre se produce el mismo valor en el término $[(1 - \alpha) \cdot v_p + \frac{1}{2}] = [v_p + \frac{1}{2}]$. Por lo tanto, para todos los resultados que se presentarán en el resto de esta subsección se seleccionaron los siguientes valores representativos para α , que incluyen todas las posibilidades de anticipación en el modelo: $\alpha = (0.12, 0.13, 0.20, 0.50, 0.90)$.

Los impactos de las diferentes estrategias de conducción pueden observarse del diagrama que se muestra en la Figura 2.4. Valores de α más pequeños, es decir, grados de anticipación de los vehículos más altos, implican flujos más altos. Esto se debe a que a medida que α es más pequeño, la distancia segura entre los vehículos es menor, lo que produce que la capacidad vehicular se incremente. Este

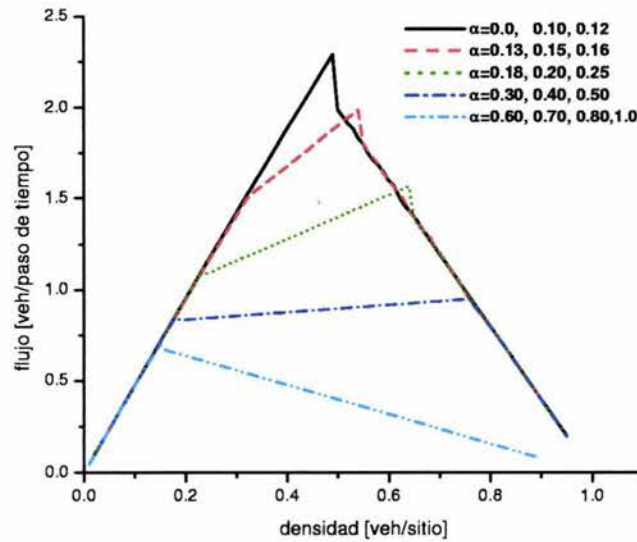


Figura 2.4: Diagrama fundamental para diferentes valores del parámetro de anticipación α y $R = 0.2$. Note que para una misma curva se asocian diversos valores de α , indica que el efecto de redondeo de la regla $R3$ en la estimación de la velocidad del vehículo de adelante

desempeño concuerda con, por ejemplo, estrategias de pelotones de vehículos (Varaiya, 1993), que explotan el conocimiento de la velocidad de los vehículos precedentes (Swaroop, 1994; Swaroop y Hedrick, 1996) y que requieren menor distancia entre vehículos (aproximadamente 1 m) para incrementar la capacidad vehicular.

Es interesante notar que, la primera pendiente positiva, que corresponde a una región de flujo libre donde no hay vehículos lentos, es similar para todos los valores de α . En esta región, los vehículos viajan con una velocidad cercana a la velocidad máxima $v_{max} - R$. Por otra parte, también se debe notar que para valores de α de 0.13 a 0.50 la forma del diagrama fundamental es significativamente diferente a los otros casos. Para estos casos, se observa una segunda pendiente positiva que indica una condición mixta, donde el flujo máximo se alcanza con una velocidad no-máxima, como consecuencia de los efectos de anticipación. Esta segunda pendiente positiva es similar a la que se ha observado en otros modelos de AC, que simulan sitios de defecto y rampas (Schadschneider y Schreckenberg, 1993).

Con la finalidad de analizar el papel de la anticipación en el flujo vehicular, en la Fig 2.5 se muestra el diagrama resultante de la relación velocidad-densidad para los mismos valores de los parámetros como en la Figura 2.4. El primer aspecto que se debe notar, es que debido a la presencia de la regla $R2$, la velocidad promedio del sistema no alcanza el valor v_{max} . Además, el papel del parámetro de anticipación α también es claro: el intervalo de densidad para el flujo libre

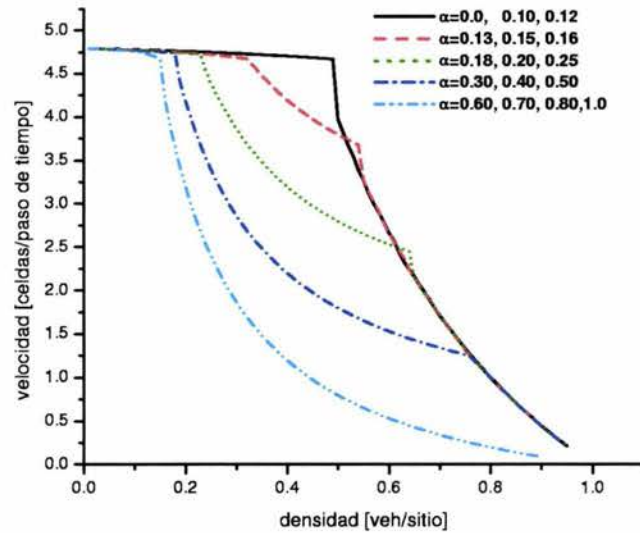


Figura 2.5: Diagrama fundamental, relación velocidad-densidad para diferentes valores del parámetro de anticipación α y $R = 0.2$.

se incrementa conforme α se decrementa. Por otra parte, este diagrama exhibe que en las regiones referidas como regiones de flujo mixto, el tránsito vehicular se organiza con una velocidad promedio menor que la correspondiente a la región de flujo libre, como ya se había inferido. La existencia de esta región mixta indica que mediante una estimación adecuada de la velocidad de los vehículos precedentes (que en el modelo se codifica con α) puede generarse un incremento en la capacidad vehicular, como consecuencia de un espaciamiento vehicular más reducido.

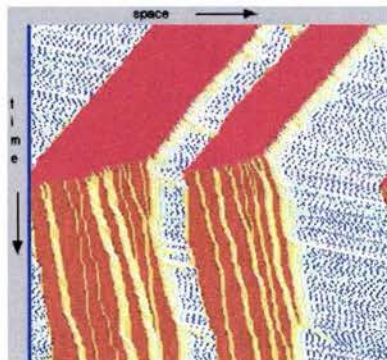


Figura 2.6: Diagrama espacio-tiempo que muestra la evolución de un sistema simulado inicialmente con $\alpha = 0.51$ ($v = 0$ en rojo, $v = 1$ en vino, $v = 2$ en naranja, $v = 3$ en amarillo, $v = 4$ en verde y $v = 5$ en azul). Después de cambiar a $\alpha = 0.5$, el desempeño cambia dramáticamente.

En la Figura 2.6 se muestra un diagrama espacio-tiempo para $R = 0.2$, $\rho = 0.5$, con la finalidad

de ejemplificar los cambios drásticos en la estructura microscópica del tránsito cuando se cambian los valores de α ³. Cada renglón de puntos representa las posiciones instantáneas de los vehículos moviéndose hacia la derecha (con una velocidad $v = 0$ en rojo, $v = 1$ en vino, $v = 2$ en amarillo, $v = 4$ en verde y $v = 5$ en azul). Mientras que los renglones sucesivos de puntos representan la posición de los mismos vehículos en el tiempo. Para este caso, la simulación se inició con un valor de $\alpha = 0.51$ donde las regiones de congestión viajan hacia atrás, en dirección contraria del tránsito. Sin embargo, después de algún periodo de tiempo se cambia el valor del parámetro de anticipación a $\alpha = 0.5$, inmediatamente se observa un cambio dramático en la pendiente de las regiones congestionadas como consecuencia de la reducción de la distancia de seguridad entre los vehículos(rojo). El sentido de las ondas del flujo se invierte, ahora viaja hacia adelante. Este tipo de desempeño se ha observado antes en otros modelos con anticipación de la velocidad (Eissfeldt y Wagner, 2003). La estructura del flujo que se observa en los diagramas espacio-tiempo es la causa del incremento de la capacidad vehicular originada por la reducción del espacio entre los vehículos. En estas simulaciones se encontró que las ramas correspondientes al flujo congestionado o estancado colapsan a una misma región (este comportamiento se discutirá más adelante), como en el modelo de AC llamado VDR (Barlovic, et al., 1998). Estos resultados son análogos a los correspondientes a los modelos llamados *slow-to-start*, donde efectivamente el flujo de salida de un estancamiento se reduce en comparación con el flujo máximo.

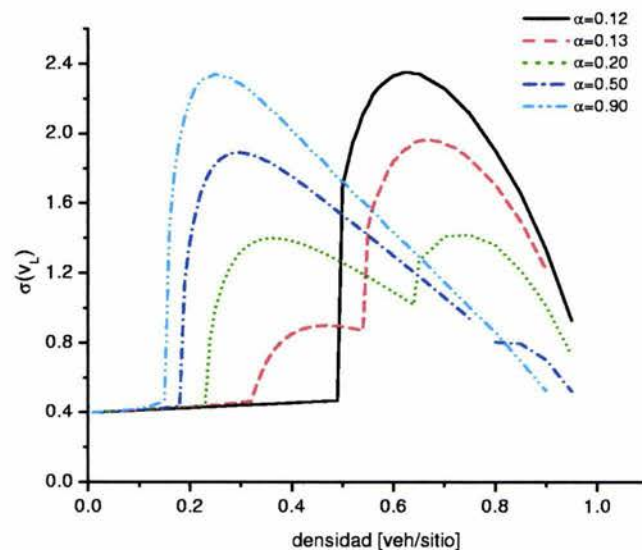


Figura 2.7: Desviación estándar de las velocidades de los vehículos individuales, para diferentes valores del parámetro α y $R = 0.2$

³Para un applet java de las simulaciones ver <http://www.cie.unam.mx/xml/tc/ft/arp/simulation.html>

Por otra parte, también es importante analizar los efectos que las diferentes estrategias producen en la seguridad y el orden entre los vehículos. En el contexto del tránsito vehicular, un análisis de la desviación estándar de la velocidad promedio en el tiempo puede dar información acerca de la seguridad del tránsito. Por ejemplo, una variación grande de velocidad de los vehículos individuales significa que, en promedio, un vehículo experimenta cambios frecuentes de la velocidad. De hecho, una variación grande de las velocidades podría también incrementar la probabilidad de accidentes de tránsito. Por lo tanto, se debe buscar una integración entre las diferentes estrategias de conducción y la seguridad del tránsito, para facilitar un uso de carretera más eficiente, es decir, lograr un tránsito vehicular con el flujo más alto posible y la mínima variación de velocidad.

Desde el punto de vista de termodinámica, la eficiencia de un sistema se relaciona a la entropía (Reiss, et al., 1986). En particular, en situaciones de no equilibrio, la producción de entropía se usa para determinar condiciones de eficiencia. En el caso del modelo presentado, si se considera que un sistema con menos producción de entropía es más eficiente que otro con producción de entropía más alta (Bejan, 1996; Salas, et al., 1999), una variación baja de las velocidades indica que el sistema es menos desordenado (en el sentido de la velocidad). De esta forma, el análisis de la desviación estándar de la velocidad (promedio e individual) obedece a dos propósitos: permite hacer conclusiones acerca de la seguridad y del orden en el sistema. En lo siguiente, se presentan dos análisis con base en la desviación estándar de la velocidad: en forma microscópica y en forma macroscópica.

Primeramente, se calculó la desviación estándar $\sigma(\bar{v})$ de las velocidades de los vehículos individuales, cada paso de tiempo, a partir del tiempo T_e , para los diferentes esquemas de conducción en la siguiente forma:

$$\sigma(v_L) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i - v_L)^2},$$

donde v_L es la velocidad promedio que resulta de las velocidades de los vehículos en la carretera, en el paso de tiempo t .

Esta desviación estándar $\sigma(v_L)$ se promedia en el tiempo, a partir del tiempo de equilibrio. Esta cantidad puede utilizarse para detectar inestabilidades del flujo y determinar límites de velocidad adecuados. En la Figura 2.7, se muestran los resultados correspondientes a $R = 0.2$ y diferentes valores de α . Como se observa, para cada valor del parámetro α , existe una región de densidad donde la variación de la velocidad es despreciable (muy baja); que de acuerdo con el diagrama fundamental que se presentó en la Figura 2.4, corresponde a la región de flujo libre donde no existen vehículos lentos y las fluctuaciones de velocidad son muy raras. Después de esta región, un aumento en la interacción vehicular causa que la variación de la velocidad se incrementa con la densidad y un máximo valor se alcanza cerca de la densidad de flujo máximo.

Un integración entre estas observaciones y el desempeño del flujo vehicular observado en los diagramas fundamentales, para mejorar la eficiencia del tránsito vehicular, que conlleva a lo siguiente:

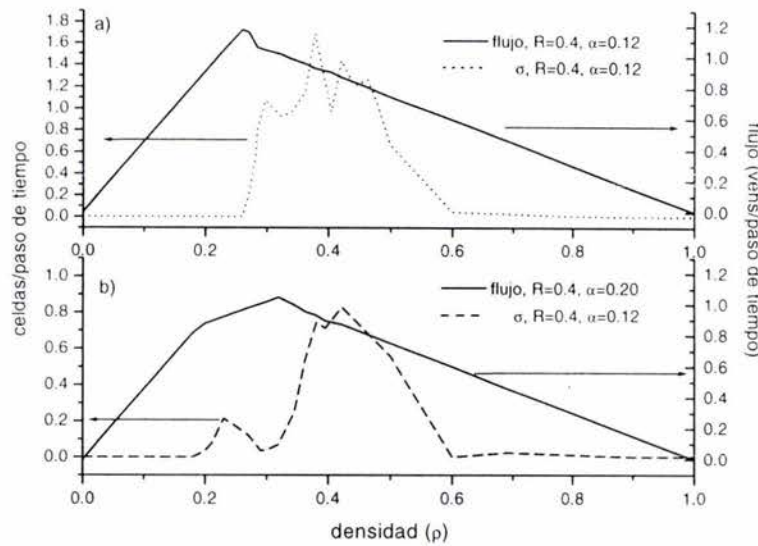


Figura 2.8: Desviación estándar de la velocidad promedio del sistema para $\alpha = 0.10$ y $\alpha = 0.20$

- i Durante el régimen de densidad, $0 \leq \rho \leq 0.5$, un esquema de conducción correspondiente a la intensidad de anticipación máxima ($\alpha \leq 0.12$) permitirá un tránsito eficiente. Esto se sustenta si se consideran los resultados de la Figura 2.4, que indican que a mayor estimación de la velocidad de los vehículos precedentes, mayor es la región de densidad asociada al flujo libre, donde la variación de velocidad se desprecia. Por lo tanto, en este régimen de densidad específico, el esquema de conducción correspondiente a la intensidad de anticipación máxima, produce el flujo más alto y garantiza seguridad en términos de velocidad⁴. Factores importantes para producir un flujo más eficiente.
- ii Sin embargo, más allá de la densidad 0.5, los resultados de la Figura 2.7 indican que el esquema de conducción (codificado en α) se debe determinar como función de la densidad existente en el sistema, si se desea mantener un tránsito vehicular con el máximo flujo posible y la mínima variación de velocidades. Mayor densidad implica una intensidad de anticipación menor. Como un ejemplo, basándose en los resultados que se muestran en la Figura 2.7, note que para $\rho \in (0.5, 0.54]$, se logrará un tránsito vehicular más eficiente si se establece un esquema de anticipación con $\alpha = 0.13$; sin embargo, para el régimen de densidad $\rho \in (0.54, 0.63]$, la eficiencia máxima se logrará con $\alpha = 0.20$.

En resumen, un análisis de la variación de la velocidad promedio con respecto a las velocidades de los vehículos individuales, puede utilizarse para determinar límites de velocidad.

⁴Sin embargo, que el entorno de la carretera también es un factor determinante en la seguridad

Por otra parte, también se analizó la varianza de la velocidad promedio en el tiempo, con la finalidad de mostrar que el modelo es capaz de reproducir el desempeño caótico que algunas veces se observa en el tránsito real en densidades que corresponden a valores donde la congestión se empieza a formar. En particular, con la intención de mostrar la presencia de un tipo de flujo sincronizado, que se explicará por la presencia de pelotones de vehículos con velocidades similares. Para ese propósito, se analizó durante la última mitad de tiempo de cada simulación, la velocidad promedio de los vehículos existentes en las últimas $L/3$ celdas del sistema para detectar pelotones que viajan sobre éste. Sea \hat{v} la velocidad promedio de los vehículos en la últimas $L/3$ celdas al tiempo t y sea \bar{v} el promedio la velocidad promedio de los vehículos en las mismas celdas desde el tiempo $T/2$ al tiempo T . Entonces la varianza de velocidad se calcula como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T - T/2} \sum_{i=T/2+1}^T (\hat{v}(t) - \bar{v})^2}$$

Como un ejemplo, considere la Figura 2.8a) que muestra el flujo y su correspondiente variación de la velocidad promedio σ , para $R = 0.4$ y $\alpha = 0.12$. De esta figura, es claro que la variación es despreciable para valores de densidad pequeños, esto indica que los vehículos viajan con la velocidad de flujo libre, sin formar pelotones. Sin embargo, en densidades alrededor de 0.25, hay una formación sorpresiva de pelotones. La varianza de velocidad más grande indica que coexisten pelotones con diferentes velocidades en la carretera ⁵. Para valores de la densidad alrededor de 0.5, la variación de la velocidad decrece repentinamente, que indica la tendencia de los pelotones para consolidarse en pelotones más grandes, que viajan con la misma velocidad baja. Para densidades más bajas, arriba de 0.6, la variación nuevamente es casi cero, esto indica que principalmente hay pelotones muy grandes con velocidad baja en la carretera. Para $R = 0.4$, valores de $\alpha \leq 0.16$ y $\alpha > 0.5$ producen desempeños similares en términos de la variación de la velocidad, aunque para este último, la variación de velocidad es más pequeña.

Por otra parte, Figura 2.8 b), se muestra también otro resultado de la varianza de velocidad y el flujo para $\alpha = 0.20$ y $R = 0.4$, que es semejante para valores $0.16 < \alpha \leq 0.5$ (con $R = 0.4$). En este caso, la variación de la velocidad muestra un desempeño bimodal. Un máximo local pequeño existe para densidades alrededor de 0.25, que indica la presencia de sincronización del flujo, mediante la formación de pequeños pelotones que viajan con una velocidad más baja. Un máximo global para la variación de la velocidad se localiza en densidades alrededor de 0.45, seguido por una sorpresiva formación de pelotones grandes que viajan con velocidad aún más baja. La variación de la velocidad en densidades bajas no muestra pelotones y para densidades muy altas, nuevamente indica pelotones muy grandes con velocidades muy bajas y posiblemente con velocidad cero.

Para el modelo que se presentó, el desempeño que se obtuvo de la simulación indica las diferencias entre las diferentes estrategias de conducción, codificadas en α . Sin embargo, ¿cuál es la causa del

⁵En algunos casos, hay vehículos parados o pelotones con velocidad > 0

comportamiento del flujo en las diferentes regiones observadas?, ¿son los parámetros determinantes en el desempeño y existencia de las mismas? En la siguiente sección se presentará un análisis analítico del modelo presentado en la sección anterior.

2.5. Resultados analíticos

Con el propósito de investigar la importancia de las diferentes estrategias de conducción en la modelación del tránsito real, se realizó un análisis profundo del comportamiento vehicular en cada región, mismo que requirió mucho tiempo en el análisis microscópico; al final se logró determinar expresiones analíticas para los puntos de transición de fase y la velocidad de los pelotones, como función de la densidad en el diagrama fundamental. En las siguientes subsecciones se presentarán estos resultados analíticos.

2.5.1. Estructura de los estados mixtos

Como punto de inicio del análisis, se calcularon las distribuciones de velocidad de los vehículos, es decir, el número de vehículos con velocidad i , para diferentes valores de α . En la Figura 2.9 se muestran las distribuciones de velocidad de los vehículos obtenidas para las diferentes ramas mixtas, es decir, diferentes valores de α donde la región mixta se presenta, con base en las observaciones del diagrama fundamental para $R = 0.2$. Se puede observar, que para cada rama, sólo existen una mayoría de vehículos con una determinada velocidad v y el resto de los vehículos moviéndose libremente (con velocidad $v_{max} = 5$ ó $v_{max} - 1$ debido al frenado aleatorio). Estos resultados indican que, el desempeño de las regiones mixtas resulta de la existencia de pelotones densos, en donde los vehículos se mueven en forma coherente con la misma velocidad v_{pl} , donde el valor de esta velocidad se incrementa en función de la intensidad de anticipación. A continuación, estos serán denotados como pelotones- v_{pl} . El estado estacionario de las regiones mixtas muestra una separación de fase dentro de una región de flujo libre y un pelotón- v_{pl} . Este comportamiento es similar al que se ha observado en modelos con reglas llamadas slow-to-start, en donde el sistema se separa en una región de flujo libre y un estancamiento denso, es decir, un pelotón-0 (Swaroop y Rajagopal, 1999).

Por otra parte, debido a que la distancia d_i , adelante de un vehículo i que se encuentre dentro de un pelotón es $d_i = 0$, su velocidad nueva (en el paso de tiempo siguiente) se determina por $v'_i = \min(v_i, d_i^s)$ con $d_i^s = [(1 - \alpha) \cdot v_p + \frac{1}{2}]$. Para un pelotón- v_{pl} que se mantiene en el tiempo (estable), v_i debe ser igual a v_{pl} . Esto produce la siguiente condición de estabilidad de un pelotón:

$$v_{pl} \leq (1 - \alpha) \cdot v_{pl} + \frac{1}{2}. \quad (2.1)$$

La ecuación (2.1) puede considerarse como una condición para el parámetro de anticipación α . Esto es, se tiene que

$$\alpha_{v_{pl}} := \frac{1}{2v_{pl}}. \quad (2.2)$$

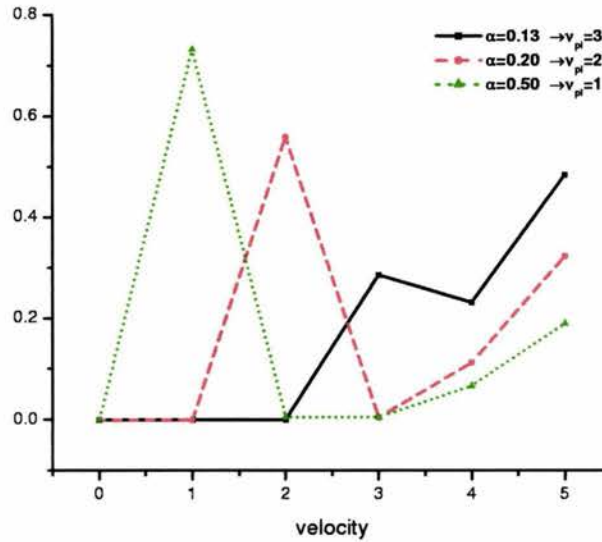


Figura 2.9: Distribuciones de velocidad para la densidad $\rho = 0.4$ y diferentes valores de α .

Con base en que el valor de v_{pl} se incrementa conforme α se decrementa, esto implica que un pelotón- v_{pl} sólo puede ser estable para

$$\alpha_{(v_{pl}+1)} < \alpha \leq \alpha_{v_{pl}} \quad (2.3)$$

Mediante un análisis profundo los resultados de simulaciones se encontró que esta condición sólo es necesaria, más no suficiente. Los pelotones- v_{pl} que pueden producirse para un valor de α dado, dependen también del parámetro de frenado R . Por ejemplo para $R = 0.2$, es posible que ocurran pelotones con $v_{pl} = 0, 1, 2, 3$ (dependiendo del valor de α); mientras que para $R = 0.4$ (mayor fluctuación de velocidades), no pueden observarse pelotones con $v_{pl} = 3$ en sistemas de tamaño infinito, aunque podrían existir en sistemas pequeños. El análisis de las simulaciones indica que la pendiente de la rama mixta en el diagrama fundamental debe ser más pequeña que $(1 - R)(v_f - 1)$, donde v_f es la velocidad promedio en el flujo libre: $v_f = (v_{max} - R)$. Esto se discutirá más adelante en la subsección 2.5.3.

Otro criterio para la estabilidad de los pelotones puede obtenerse de la condición que el flujo de entrada (inflow) y el flujo de salida (outflow) de un pelotón deben ser idénticos en el estado estable. En lo siguiente, se deducirán estimaciones para estos flujos, para de esta forma obtener el diagrama fundamental en la región mixta.

El flujo de salida de un pelotón- v_{pl} se determinará por el tiempo promedio T_w , que necesita el vehículo de enfrente de un pelotón para acelerar a la velocidad $v_{pl} + 1$. Suponiendo que este vehículo tiene una distancia grande hacia adelante, este tiempo se determina por la constante de frenado

aleatorio R mediante $T_w = \frac{1}{1-R}$, ya que un vehículo tiene una probabilidad $(1 - R)$ de acelerarse. Por lo tanto, en la región de flujo libre del sistema, la distancia promedio hacia adelante (en celdas) Δx_f es dada por $\Delta x_f = T_w(v_f - v_{pl}) + 1$. Esta consideración es muy similar al razonamiento usado en (Swaroop y Rajagopal, 1999).

Suponiendo que un pelotón consiste de $N_{v_{pl}}$ vehículos y la región de flujo libre de N_f vehículos, se tiene

$$N = N_{v_{pl}} + N_f, \quad y \quad L = N_{v_{pl}} + N_f \Delta x_f. \quad (2.4)$$

Aquí, N es el número total de vehículos. Además, se ha supuesto que puede despreciarse la región de transición entre el pelotón, donde todos los vehículos tienen distancia $d_i = 0$ y la región de flujo libre, donde la distancia promedio es dada por Δx_f . Eliminando N_f de 2.4 se encuentra

$$\frac{N_{v_{pl}}}{L} = \frac{\rho \Delta x_f - 1}{\Delta x_f - 1}. \quad (2.5)$$

Ahora es posible calcular el flujo $J = \rho \bar{v}$, del correspondiente estado de fase separado. La velocidad promedio \bar{v} , en la presencia de un pelotón- v_{pl} se da por

$$\bar{v} = \frac{N_{v_{pl}} v_{pl} + N_f v_f}{N}. \quad (2.6)$$

Un cálculo directo, con base en los resultados dados arriba, produce para el flujo de la región mixta

$$J_{v_{pl}} = (1 - R) + (v_{pl} - (1 - R)) \rho. \quad (2.7)$$

Estos resultados están en excelente concordancia con los resultados de simulaciones de computadora. Nótese que $v_{pl} - (1 - R)$ es la pendiente de estas rectas y debido a que $(1 - R) < 1$, todas las pendientes correspondientes a los estados mixtos en el diagrama fundamental son positivas, excepto aquellas para los pelotones-0 que son responsables de la rama estancada, con flujo bajo y pendiente negativa.

Con esto, se ha explicado las dos primeras pendientes en el diagrama de la Figura 2.4.

2.5.2. Estructura de los estados congestionados

Por otra parte, como se observó del diagrama fundamental para densidades grandes, todas las curvas colapsan en una misma rama congestionada, donde el flujo se decrementa con el incremento de la densidad. En el rango (2.3), donde un pelotón- v_{pl} puede existir, la rama congestionada (pendiente negativa) se caracteriza por la coexistencia de un congestionamiento compacto (pelotón-0) y varios pelotones- v . Los pelotones- v se forman cuando un grupo de vehículos escapa del estancamiento. Como se argumentó en la subsección anterior, el primer vehículo escapa después de un tiempo de espera promedio $T_w = \frac{1}{1-R}$. Debido a la anticipación, el segundo vehículo puede moverse en el mismo paso de tiempo con probabilidad $1 - R$ y así sucesivamente. Por lo tanto, el número promedio de vehículos que escapan en el mismo paso de tiempo se da por

$$\bar{l} = \frac{\sum_{l=1}^{\infty} l(1-R)^l}{\sum_{l=1}^{\infty} (1-R)^l} = \frac{1}{R}. \quad (2.8)$$

Todos estos vehículos que escapan forman un pelotón de longitud \bar{l} , donde el valor de v_{pl} depende de la región del parámetro, como se discutió arriba. Debido a que el tiempo promedio de espera para el escape de un vehículo es T_w , la distancia promedio entre dos pelotones- v_{pl} es $\Delta x_c = v_{pl} T_w = \frac{v_{pl}}{1-R}$.

Para calcular el flujo en la rama congestionada, nuevamente se desprecian las regiones de transición y se asume que sólo están presentes un estancamiento con N_0 vehículos y n pelotones- v_{pl} con un número total de $N_{v_{pl}}$ vehículos. Entonces, se tiene que $N_0 + N_{v_{pl}} = N$, con $N_{v_{pl}} = n\bar{l}$. Además, $N_0 + N_{v_{pl}} + n\Delta x_c = L$, donde N_0 y $N_{v_{pl}}$ son las longitudes totales de los pelotones y $n\Delta x_c$ es el espacio total entre los pelotones. Estas relaciones producen

$$1 = \frac{1}{L} (N + n\Delta x_c) = \rho + \frac{N_{v_{pl}}}{L} \cdot \frac{\Delta x_c}{\bar{l}}. \quad (2.9)$$

La velocidad promedio de los vehículos en la rama congestionada es $\bar{v} = \frac{N_{v_{pl}} v_{pl}}{N}$. Con base en (2.9), esto implica que el flujo

$$\begin{aligned} J_{\text{cong}} &= \rho \bar{v} = \frac{N}{L} \frac{N_{v_{pl}}}{N} v = (1 - \rho) \frac{\bar{l}}{\Delta x_c} v_{pl} \\ &= \frac{1 - R}{R} (1 - \rho). \end{aligned} \quad (2.10)$$

Note que, *este resultado es independiente de la velocidad v_{pl} de los pelotones* y del parámetro de anticipación α . Este resultado está en excelente concordancia con datos de simulación, justificando, por ejemplo, la inferencia hecha arriba acerca de las regiones de transición. Decir que los resultados están en excelente acuerdo se refiere a que se sobreponen los resultados analíticos con los resultados de simulación.

2.5.3. Regiones de estabilidad

Para un α fijo, puede ahora estimarse la región de estabilidad $\rho_1 \leq \rho \leq \rho_2$ para los estados mixtos, donde ρ_1 es la densidad de la frontera inferior (más a la izquierda) y ρ_2 la densidad de frontera superior (derecha). En la densidad de frontera inferior ρ_1 , el número de vehículos $N_{v_{pl}}$ en el pelotón- v se desvanece. De (2.5) se tiene que $\rho_1 \Delta x_f - 1 = N_{v_{pl}}/L(\Delta x - 1) = 0$, que sustituyendo el valor de Δx produce

$$\rho_1 = \frac{1 - R}{v_f - v_{pl} + (1 - R)}. \quad (2.11)$$

La frontera superior ρ_2 no se determina por la condición $N_{v_{pl}} = N$, es decir, que todos los vehículos pertenezcan al pelotón- v_{pl} . Esta podría corresponder a la densidad $\rho = 1$. De hecho, la inestabilidad del estado mixto ocurre primero, que de acuerdo a 2.7 y 2.10 (igualándolas) se produce en la densidad

$$\rho_2 = \frac{(1 - R)^2}{R(v_{pl} + R - 2) + 1} \quad (2.12)$$

el flujo (2.7) de la rama mixta llega a ser más grande que el correspondiente a la rama congestionada, ver (2.10) y por lo tanto (al menos de las condiciones iniciales aleatorias), el flujo de la rama

congestionada es observado. Sin embargo, las simulaciones indican efectos de histéresis y metaestabilidad (diferentes estados para una misma densidad con base en el estado inicial), en el régimen de densidad grande. Para $v_{pl} = 0$, la densidad de transición superior llega a ser $\rho_2 = 1$, independientemente de R . consistente con la observación de que la región mixta para $v_{pl} = 0$ se extiende hasta la densidad máxima (ver Figura 2.4).

Debido a que ρ_2 debe ser más grande que ρ_1 , esto produce una condición adicional para la estabilidad de las ramas (existencia de las regiones mixtas). Es fácil revisar que $\rho_1 < \rho_2$ si

$$(1 - R)v_f > v_{pl}. \quad (2.13)$$

Esta es justamente la condición obtenida de las simulaciones de computadora, en la subsección 2.5.1.

En resumen, una región mixta con pelotones- v_{pl} sólo puede existir para $[1/(2(v_{pl} + 1)) < \alpha \leq 1/(2v_{pl})]$ y R satisfaciendo (2.13). Si estas condiciones son satisfechas, los pelotones- v ocurren en el intervalo de densidad $\rho_1 \leq \rho \leq \rho_2$, donde ρ_1 y ρ_2 están dados por (2.11) y (2.12), respectivamente.

Un aspecto importante de la determinación de las relaciones para el flujo en las diferentes fases y de los puntos críticos, para las transiciones de fase permitirá ajustar parámetros α y R a situaciones reales.

2.6. Comentarios del capítulo

Pronosticar los impactos de las diferentes estrategias de conducción juega un papel esencial para proponer alternativas de tránsito que permitan lograr un desempeño más eficiente en el tránsito real. En este capítulo, se introdujo e investigó una modificación del modelo de tránsito vehicular NaSch, con el objeto de capturar mejor las reacciones de los conductores para considerar seguridad en la carretera. Como resultado, se adiciona al modelo un nuevo parámetro de anticipación $\alpha \in [0, 1]$, que permite establecer una distancia segura dependiente de la velocidad de los vehículos precedentes. La adición de este parámetro prueba ser útil para describir diferentes situaciones de tránsito manual, automatizado y mixto.

Los resultados de simulaciones que se presentaron en este capítulo, que corresponden a una estimación cautelosa de la velocidad del vehículo precedente (α grande), están en excelente acuerdo con, por ejemplo, la forma del diagrama fundamental empírico de una carretera de Canadá. Esto es un buen indicador de que modelo modificado puede reproducir las características básicas del tránsito real. Además, una comparación del diagrama fundamental de este modelo con otros modelos de AC claramente indica que éste reproduce más eficientemente el desempeño del flujo.

Por otra parte, los resultados de la simulación para esquemas de conducción asociados a intensidades de anticipación intermedios (α entre 0.13 y 0.5) exhiben, en un cierto régimen de densidad, una separación de fase dentro de una región de flujo libre y los aquí llamados pelotones- v_{pl} . En estos pelotones densos los vehículos se mueven con la misma velocidad v_{pl} y la distancia (en celdas) hacia adelante se desvanece. La velocidad del pelotón, v_{pl} , es determinada mediante la intensidad de la

anticipación (la distancia segura deseada entre los vehículos). Esta formación de pelotones que se observó en el régimen mixto juega un rol importante en los Sistemas de Carretera Automatizados para incrementar la capacidad vehicular. Cabe mencionar, que los resultados analíticos que se obtuvieron fueron aceptados para publicación como artículo en *Journal of Physics A: Mathematical and General* (Lárraga, et al, 2004)

Por lo tanto, los resultados que se obtuvieron pueden utilizarse para ayudar a aclarar los efectos de la anticipación, que se codifica en el parámetro α . El flujo máximo (capacidad), así como el intervalo de densidad para la fase de flujo libre están en función inversa con α : Valores de α más pequeños (mayor estimación de la velocidad del vehículo precedente) implican flujos más altos y un régimen de densidad de flujo libre mayor. Este desempeño está también en acuerdo con, por ejemplo, el uso de ciertas estrategias de anticipación que explotan el conocimiento de la velocidad de los vehículos precedentes para incrementar la capacidad vehicular (Rillings, 1997).

Aún más, los análisis de la variación de las velocidades de los vehículos individuales y de la velocidad promedio del sistema, indican la importancia de determinar un esquema de conducción adecuado, es decir, que requiere una determinada política de espaciado seguro, en función de la densidad vehicular existente. Una integración entre la seguridad y el desempeño del flujo basada en la densidad puede producir un tránsito vehicular más eficiente, con el máximo flujo posible y la mínima variación de las velocidades (uno de los factores de accidentes).

Las consideraciones en este capítulo mostraron la flexibilidad de las aproximaciones de autómatas celulares para modelar problemas del tránsito vehicular complejos. Una modificación sencilla y natural de las reglas del modelo NaSch para considerar diferentes esquemas de conducción, permitió describir la formación de pelotones moviéndose coherentemente que se ha observado en algunos esquemas de anticipación.

En conclusión, los resultados que se presentaron en este capítulo muestran que la aplicación del modelo no sólo podría ser relevante para Sistemas de Carretera Automatizados, sino también para establecer políticas de espaciado y de anticipación, que juegan un papel esencial en la modelación del tránsito real.

Aunque en este capítulo, el modelo modificado se simuló en un solo carril, es posible aplicarlo a topologías de carretera más complejas en forma satisfactoria, como se verá en el siguiente capítulo donde se extiende el modelo para carreteras de varios carriles.

Capítulo 3

El modelo con varios carriles

3.1. Introducción

Recientemente, se ha incrementado el entendimiento del tránsito sobre un carril mediante el uso de modelos simples (ver por ejemplo (Wolf y Schreckenberg, 1998)). Esto se debe a que la modelación del tránsito vehicular sobre un solo un carril, es un punto inicial para entender su comportamiento. Aunque se podría pensar que estos modelos también explican el tránsito de carreteras con más de un carril y vehículos homogéneos (por ejemplo, misma velocidad límite), estos definitivamente fallan cuando el tránsito en carriles diferentes se comporta de manera distinta. Por otra parte, el tránsito vehicular real consiste de diversos tipos de vehículos (no-homogéneo), cuyas velocidades límites son diferentes y los vehículos más rápidos tienden a rebasar a los más lentos. Desde luego, que la tendencia a rebasar no puede modelarse si se considera un solo carril. Por lo tanto, modelar diferentes tipos de vehículos sobre un solo carril resultaría en pelotones de vehículos lentos, seguidos por algunos más rápidos y así sucesivamente. Como una consecuencia, la velocidad promedio se reduciría a la velocidad del vehículo más lento (Rickert, et al., 1996). De esta forma, con la finalidad de modelar un tránsito más apegado a la realidad, se requiere la modelación del tránsito sobre más de un carril (que aquí se le llamará multicarril). En este capítulo, se extiende el modelo que se introdujo en el capítulo dos para modelar el tránsito de sistemas multicarril.

3.2. Consideraciones para la modelación

Para lograr modelos realistas de carreteras multicarril, se requiere considerar la dinámica microscópica, es decir, de cada vehículo individual y tomar en cuenta características específicas de estas carreteras complejas.

En principio, diversos modelos para el tránsito vehicular multicarriles (ver por ejemplo, (Gipps, 1986; Knospe, et al., 1999; Helbing y Huberman, 1998)) formulan en forma análoga las reglas microscópicas para controlar el desempeño del conductor al cambiar de carril, aún cuando se basan en teorías diferentes:

- Primeramente, un vehículo necesita un criterio incentivo para cambiar de carril, es decir, una

razón para cambiar de carril (por ejemplo, el vehículo de adelante es muy lento o se desea regresar al carril preferente).

- Segundo, un cambio de carril sólo será posible si se satisface un criterio de seguridad que garantice que no se provocan incidentes (¿puedo cambiar de carril sin causar una colisión?).

Desafortunadamente, la formulación de reglas de cambio de carril realistas es muy difícil. Sin embargo, el propósito general debe ser el producir resultados que se puedan considerar aceptables al compararlos con resultados de mediciones. En particular, para el tránsito de dos carriles existen muy pocos resultados empíricos que ayuden a especificar reglas de cambio de carril (Chang y Kao, 1991; Hall y Lam, 1988; Brackstone y McDonald, 1996). Estos resultados indican que la habilidad para cambiar carriles se debe incrementar con el incremento de la densidad, mostrar un máximo en la vecindad del flujo máximo y entonces se debe decrementar con la densidad. Sin embargo, los cambios de carril pueden ser posibles todavía en densidades grandes.

Una característica especial del tránsito en las carreteras en países como Alemania y México, es la inversión de uso de carril que se ha observado empíricamente. Aunque la preferencia del carril derecho existe, la distribución del flujo llega a ser asimétrica y el flujo es más grande sobre el carril izquierdo, que sobre el carril derecho, en algunas condiciones específicas. En contraste, en el tránsito urbano o en carreteras sin las restricciones del carril derecho, el flujo se distribuye igualmente en ambos carriles (Chang y Kao, 1991; Hall y Lam, 1988; Brackstone y McDonald, 1996).

Para extender el modelo de un carril para el tránsito de multicarril se deben introducir reglas de cambio de carril que consideren los aspectos observados empíricamente. En particular, el conjunto de reglas de cambio de carril debe (i) consistir de reglas locales, simples, (ii) ser robusto al considerar vehículos lentos, esto es, el flujo no debe ser dominado por una pequeña fracción de vehículos lentos, (iii) reproducir curvas de cambio de carril empíricas, es decir, dependientes de la densidad, (iv) mostrar la inversión de cambio de carril que se ha observado empíricamente (en el caso de reglas de cambio de carril asimétricas), donde con el incremento de la densidad de los carriles se invierte y (v) no debe cambiar el desempeño dinámico del modelo en un carril.

En general, las reglas de cambio de carril pueden ser simétricas ó asimétricas, con respecto a los carriles o a los vehículos. Mientras las reglas simétricas tratan ambos carriles en forma semejante (por ejemplo, el tránsito urbano o el tránsito de las carreteras en Estados Unidos), los conjuntos de reglas asimétricas se utilizan para simular carreteras, como México, donde los cambios de carril se rigen por un carril derecho preferente para circular y la prohibición de rebasar sobre el carril derecho. Aún más, una asimetría entre vehículos, por ejemplo, coches y camionetas, existe en una carretera de dos carriles si se prohíbe que las camionetas cambien al carril izquierdo.

Como antecedente, en el contexto de los autómatas celulares se han propuesto diversas extensiones del modelo NaSch para modelar el tránsito vehicular de dos carriles (Rickert, et al., 1996; Nagatani, 1996; Wagner, et al., 1997; Nagel, et al., 1998; Knospe, et al., 1999). Estas extensiones son capaces de reproducir la inversión de uso de carril que se observa empíricamente; sin embargo,

éstas fallan en la modelación del número de cambios de carril en función de la densidad. Aún más, en una modificación reciente al modelo NaSch (Knospe, et al.; 2002), se mostró que en la aproximación de autómatas celulares pueden existir algunos problemas si se introducen diferentes tipos de vehículos; sin embargo, estos inconvenientes pueden minimizarse mediante la consideración de efectos de anticipación; como es el caso de modelo que se definió en el capítulo dos.

En la búsqueda de un modelo que conserve la sencillez, pero a la vez reproduzca lo mejor posible los fenómenos que se observan empíricamente, en este capítulo se extenderá el modelo que se presentó en el capítulo dos, para modelar el tránsito vehicular de dos carriles. En la tercera sección, se definirá un modelo con reglas de cambio simétricas. Mientras que en la cuarta sección, se definirá un modelo con reglas de cambio de carril asimétricas con respecto a los carriles. En el caso asimétrico, se considerarán las estrategias de conducción de las carreteras en México, donde el carril izquierdo se prefiere para rebasar. Además, para este caso también se considerará el caso de sistemas con dos tipos de vehículos en el sistema (por ejemplo, coches y camionetas), es decir, vehículos con diferente velocidad límite. Para los dos tipos de modelos sólo se presentarán resultados de simulación de computadora.

Las simulaciones de los dos modelos que se presentarán se implementaron para una carretera de 10,000 celdas por carril, con condiciones de frontera periódicas. Al igual que para el modelo de un carril, la configuración inicial es aleatoria, con N vehículos que se colocan entre los dos carriles, con velocidades aleatorias entre 0 y la velocidad límite del tipo de vehículo v_{max} ; de tal forma que la densidad promedio por carril es $\rho = N/(2 \cdot L)$. Con la finalidad de obtener el número de cambios de carril y el uso de carril, es decir, el porcentaje de vehículos del total por carril, se realizan mediciones promedio en todo el segmento de carretera. Cabe mencionar que los resultados que se presentarán corresponden al valor del parámetro de seguridad $\alpha = 0.75$ y para el factor de frenado aleatorio, $R = 0.2$; estos valores se seleccionaron con base en los resultados que se obtuvieron para estos valores de los parámetros en el caso del modelo de un carril que mostraron una buena concordancia con datos de mediciones.

3.3. El modelo simétrico

En principio, todos los conjuntos de reglas de cambio de carril de los modelos basados en autómatas celulares para tránsito vehicular son formulados en forma análoga (Knospe, et al., 2002). Primeramente, un vehículo necesita un criterio incentivo para cambiar de carril. Segundo, un cambio de carril sólo se lleva a cabo si se satisfacen las restricciones de seguridad .

Un cambio de estado del sistema se desempeña en dos pasos:

- (i) En el primer paso, los vehículos cambian de carril de acuerdo con las reglas de cambio que se formulan y no se mueven hacia adelante. Los vehículos se mueven sólo hacia un lado, no avanzan. Note que, en la realidad la consideración de este sub-paso no parece ser lo más adecuado.

dado que los vehículos son usualmente incapaces de realizar sólo movimiento transversal y este tomará más de 1 s. Sin embargo, esto tiene sentido físico al considerar el siguiente sub-paso.

- (ii) En el segundo paso, cada carril se desempeña independientemente con base en el modelo de un carril definido en el capítulo dos sección dos (esto permitirá el desempeño paralelo). En este segundo paso, se usa la configuración resultante del cambio de carril en el primer paso.

Ambos pasos se aplican a todos los vehículos, cada paso de tiempo en que se simula el sistema.

Como un primer paso hacia un modelo realista para el tránsito de carretera de dos carriles, se estudiaron reglas de cambio de carril simétricas, es decir, con conjuntos de reglas idénticas para cambio de carril de izquierda a derecha y de derecha a izquierda. La estrategia de cambio de carril considera los criterios incentivo y de seguridad en la siguiente forma: Primeramente, un vehículo intentará cambiar de carril, si su velocidad actual es mayor que la distancia segura con respecto a su predecesor en su carril actual. De tal forma, que un vehículo puede optimizar su tiempo de viaje y conducir tan rápido como le sea posible, mediante la estimación de una distancia de seguridad dependiente del vehículo precedente. Segundo, un cambio de carril se lleva a cabo sólo si la distancia del vehículo tanto al vehículo predecesor como al vehículo sucesor en el carril objetivo (destino) es suficiente para realizar un cambio de carril seguro; es decir, la distancia existente evita fluctuaciones abruptas de velocidad que conduzcan a accidentes. Para incrementar la eficiencia de los cambios de carril, se anticipan los movimientos de los vehículos precedentes, en el carril destino y el actual, mediante el parámetro de anticipación α definido en el modelo de un carril.

Considérense las variables relevantes para las reglas de cambio de carril que se ilustran en el Cuadro 3.1. Nótese que las primas de las variables se refieren al carril objetivo a donde se desea cambiar el vehículo i (ver Figura 3.1)

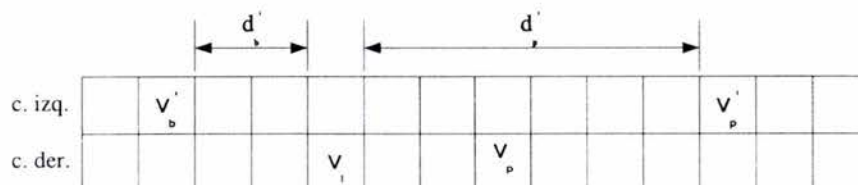


Figura 3.1: Esquema de un segmento de carretera e ilustración de las variables relevantes para las reglas del cambio de carril.

Las reglas de cambio de carril que se proponen son entonces como sigue:

- i Criterio incentivo: Si $v_i > d_i^s$

Cuadro 3.1: Variables importantes para la definición del modelo multicarril

Variable	Descripción
v_i y x_i	Velocidad y posición, respectivamente, del vehículo que desea cambiarse.
v_p y x_p	Velocidad y posición, respectivamente, del vehículo que precede a i en su mismo carril
v'_p y x'_p	Velocidad y posición, respectivamente, del vehículo predecesor de i en el carril objetivo
v'_s y x'_s	Velocidad y posición, respectivamente, del vehículo sucesor de i en el carril objetivo
d_i	$x_p - x_i - 1$, distancia espacial en celdas
d'_i	$x'_p - x_i - 1$
d'_s	$x_i - x_s - 1$
d_i^s	$d_i + [(1 - \alpha) \cdot v_p + 1/2]$
$d_i^{s'}$	$d'_i + [(1 - \alpha) \cdot v'_p + 1/2]$
$d_s^{s'}$	$d'_s + [(1 - \alpha) \cdot v_i + 1/2]$

- ii Criterio de seguridad: Si $(d_i^{s'} \geq v_i)$ y $(d_s^{s'} \geq v_s)$ y la posición x_i en el carril objetivo está vacía)

Es importante notar que, la velocidad de los vehículos que preceden al vehículo i , en el carril actual y en el carril objetivo, se consideran en el proceso de cambio de carril (mediante α). Cabe mencionar que para incrementar la seguridad en el desempeño del cambio de carril, puede reducirse la interacción con el vehículo sucesor en el carril objetivo, es decir, considerar sólo la distancia espacial (d'_s) y no la distancia de seguridad efectiva ($d_s^{s'}$) en el criterio de seguridad. Sin embargo, en los resultados que se presentarán en este capítulo se utilizó la distancia con anticipación de la velocidad del vehículo i .

3.3.1. Resultados de simulación

En la simulación del modelo simétrico, las reglas de cambio de carril se aplican a todos los vehículos, cada paso de tiempo de la simulación. Para evitar colisiones, primeramente se aplica el cambio del carril derecho al izquierdo y después del carril izquierdo al derecho. Cada paso de tiempo, un vehículo sólo puede cambiarse una vez de carril, es decir, no es posible que un vehículo se cambie del carril derecho al izquierdo y en el mismo paso de tiempo se retorne nuevamente al carril derecho. Una vez que los cambios de carril se llevan a cabo, la actualización de las velocidades de los vehículos de cada carril se hace en forma independiente, se aplican las reglas dinámicas como

se definieron para el modelo de un solo carril del capítulo dos.

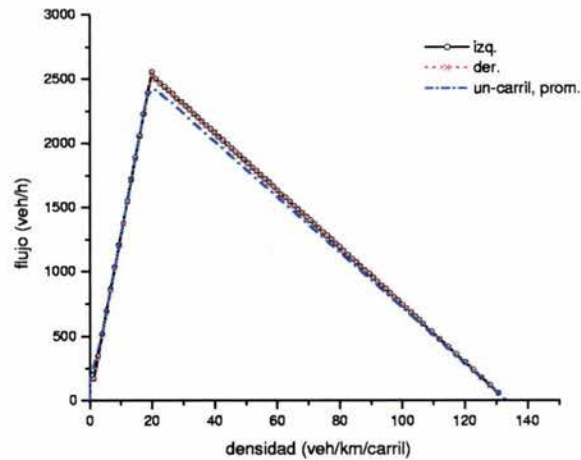


Figura 3.2: Diagrama fundamental para el modelo simétrico para valores de $R = 0.2$ y $\alpha = 0.75$. Note que el comportamiento del flujo vehicular es similar en ambos carriles.

Para cada simulación, se permite que el sistema evolucione $T * 15L$ pasos de tiempo ($L=10,000$ celdas, por carril). Los primeros $T * 10L$ pasos de tiempo se descartan para permitir que se alcance un estado estable de las variables. Posteriormente, se realiza una medición de las variables del tránsito cada paso de tiempo y se obtiene un promedio de las mismas sobre los $T * 5L$ pasos de tiempo restantes. Las variables que se miden son la velocidad promedio espacial, la densidad promedio en el espacio y el flujo promedio vehicular. También se mide el número de cambios de carril promedio y el porcentaje de vehículos en cada carril, este último determina la ocupación de cada carril.

La simetría de las reglas de cambio de carril se refleja en el diagrama fundamental que se muestra en la figura 3.2. Ambos carriles muestran la misma relación flujo-densidad; especialmente tienen el mismo flujo máximo $q_{m\acute{a}x}$, en la misma densidad crítica ρ_c . Además, la simetría de las reglas de cambio es responsable de que se produzca la misma distribución de la densidad en ambos carriles. Note que el flujo promedio por carril es ligeramente más alto que el flujo promedio para el modelo de un solo carril. Por lo tanto, el flujo promedio total es más alto que dos veces el flujo en el sistema de un carril debido a la capacidad que tienen los conductores posibilidad para rebasar.

Por otra parte, en la figura 3.3 se muestra el número de cambios de carril promedio por vehículo, en una hora. Note que el número máximo de cambios se alcanza en la vecindad del flujo máximo, es decir, cerca de la densidad crítica que se obtuvo en el correspondiente diagrama fundamental. Posteriormente, con el incremento de la densidad, el número de cambios de carril decae al valor de una especie de meseta; este valor permanece hasta que, en densidades muy grandes, los cambios ya no son posibles.

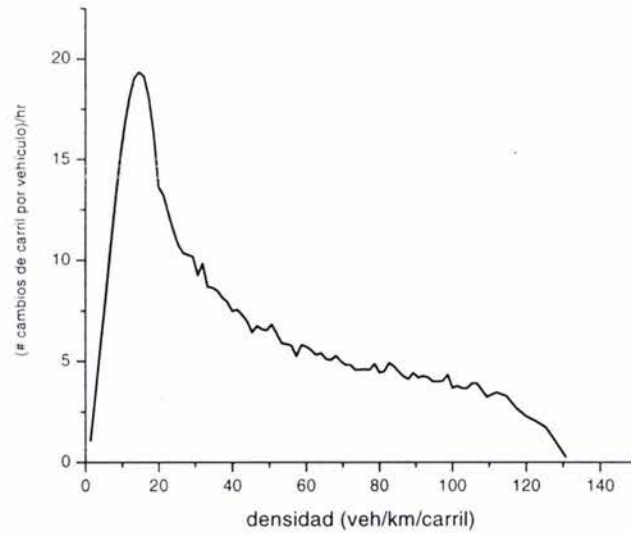


Figura 3.3: Número de cambios de carril por vehículo, en una hora, resultante del modelo de multicarril simétrico.

Los resultados para el modelo simétrico reproducen cualitativamente bien el comportamiento del tránsito como se observa en la realidad. Sin embargo, debido a la simetría en el cambio de carril, no es posible observar una inversión de uso de carril como sucede en las carreteras en México. Por lo tanto, en la siguiente sección se presentará un modelo de multicarriles con reglas de cambio de carril asimétricas.

3.4. El modelo asimétrico

En la definición de las reglas de cambio de carril asimétricas, se debe tomar en cuenta las normas de conducción de acuerdo al problema bajo consideración, por ejemplo, las normas de vialidad en las carreteras en México. Dos mecanismos conducen a una asimetría entre los carriles en las carreteras en México:

- (i) La preferencia de conducción sobre el carril derecho se obliga por la regulación legal de usar el carril derecho tan frecuentemente como sea posible.
- (ii) La prohibición de rebase por el carril derecho, que prohíbe a un vehículo que conduce en el carril derecho rebasar a un vehículo que conduce sobre el carril izquierdo.

Para aclarar cual de estos mecanismos es el responsable de la inversión de uso de carril que se observa en el tránsito real, primeramente se tratará la preferencia del carril derecho. La preferencia

del carril derecho obliga a cambios del carril izquierdo al carril derecho, es decir, a que un conductor siempre intente regresar al carril derecho después de rebasar, aunque en la realidad algunos conductores no lo realicen. Obviamente, si sólo se considera este mecanismo en la modelación, no se produce una descripción adecuada del uso de carril, debido a que los vehículos predominarían sobre el carril derecho, más que sobre el izquierdo. Por lo tanto, nunca se produce una inversión de uso de carril, como sucede en la realidad.

Por otra parte, si únicamente se considera la prohibición de rebase sobre el carril derecho, implica que un vehículo en el carril derecho cuya distancia segura al vehículo precedente en el carril izquierdo sea menor que su velocidad, debe cambiar de carril. Sin embargo, la prohibición de rebase en el carril derecho no se formula en un sentido estricto, dado que se permite que los vehículos en el carril derecho rebasen a un vehículo que conduce sobre el carril izquierdo, siempre que el cambio de carril no sea posible. Como un resultado, la mayoría de los vehículos estarán en el carril izquierdo para todas las densidades. Con el incremento de la densidad, esta diferencia de uso de carril se decrementa, sin embargo, no es posible observar una inversión de uso de carril.

En resumen, no es posible obtener una inversión de uso de carril si en la modelación sólo se considera la prohibición de rebase sobre el carril derecho o la preferencia del carril derecho. Por lo tanto, si se desea reproducir una inversión del uso de carril semejante con la de la realidad, se debe introducir simultáneamente, la preferencia del carril derecho y la prohibición de rebase sobre el carril derecho. Es importante también notar que una implementación directa de la prohibición de rebase conduce a una frecuencia de cambios de carril alta.

En la definición de las reglas del modelo que se propone, se permite a los vehículos del carril derecho rebasar a su predecesor sobre el carril izquierdo, sin embargo se debe usar preferentemente el carril izquierdo para ello. Con esta consideración, se introduce la preferencia para conducir en el carril derecho y la prohibición de rebasar sobre el carril derecho simultáneamente. Por lo tanto, se reduce la habilidad para cambiar del carril izquierdo al carril derecho de tal forma que, los vehículos sobre el carril izquierdo regresan al carril derecho sólo si existe espacio suficiente en ambos carriles que evite así, el denominado cambio ping-pong (en donde todos los vehículos se cambian de carril al mismo tiempo). Las reglas de cambio de carril, toman en cuenta la misma notación que se definió para el modelo simétrico (ver Cuadro 3.1), son las siguientes:

Cambio del carril derecho al izquierdo

i Criterio incentivo:

$$\text{Si } v_i > d_i^s$$

ii Criterio de seguridad:

$$\text{Si } (d_i^{st} \geq v_i) \text{ y } (d_b^{st} \geq v_b) \text{ y}$$

la posición x_i en el carril objetivo está vacía.

Cambio del izquierdo al derecho

i Criterio incentivo:

$$\text{Si } (t_p^h \geq 3.0) \text{ y } ((t^h \geq 3) \text{ o } (v_i > d_i^s))$$

ii Criterio de seguridad

$$d_b^{s'} \geq v_b \text{ y } x_i' \text{ en el carril objetivo está vacía.}$$

Los dos tiempos $t^h = d_i^s/v_i$ y $t_p^h = d_i^{s'}/v_i$, proporcionan el tiempo efectivo que un vehículo necesita para alcanzar la posición de su predecesor y su predecesor sobre el carril destino. Estos tiempos se introducen con la finalidad de retardar el cambio del carril izquierdo al carril derecho. Note que, en la determinación de estos tiempos se hace uso de las distancias de seguridad necesarias para evitar colisiones (es decir considera la anticipación). Debido a que estos tiempos consideran la velocidad de los vehículos, se permite que los vehículos lentos cambien de carril aún en distancias de seguridad pequeñas¹.

Con los dos parámetros t^h y t_p^h es posible considerar la inversión de uso de carril. En densidades pequeñas, un vehículo cambia del carril izquierdo al derecho si el tiempo que necesita para alcanzar a su predecesor, tanto en el carril actual como en el carril objetivo, es mayor o igual a 3s². Por otra parte, en densidades grandes la condición $v_i > d_i^s$ garantiza un incentivo para cambiar al carril derecho.

3.4.1. Resultados de simulación

Para las simulaciones del modelo asimétrico, se consideraron los mismos valores de los parámetros descritos en el modelo simétrico. La mecánica para la medición de las variables, es también semejante. Como punto inicial de la investigación del modelo con reglas asimétricas, las simulaciones se realizaron para un mismo tipo de vehículos, es decir, vehículos con la misma velocidad límite. Se pensó así, con la finalidad de ver si el modelo podía reproducir correctamente el comportamiento del tránsito de carreteras con carriles asimétricos como se observa en la realidad. En la figura 3.4a se ilustra el resultado de la simulación con reglas de cambio de carril asimétricas y vehículos homogéneos mediante el diagrama fundamental. Se encontró que, en densidades pequeñas, donde el espacio entre vehículos es suficiente, el flujo sobre el carril derecho es más grande que en el izquierdo; dado que la densidad se distribuye asimétricamente. Sin embargo, con el incremento de la densidad este comportamiento cambia y más vehículos intentan cambiar del carril derecho al carril izquierdo, lo que produce un incremento en la densidad vehicular y el flujo en el carril izquierdo. Este incremento continúa hasta que se alcanza un flujo máximo a partir del cual la interacción entre los vehículos aumenta. Como consecuencia de ello, el rompimiento del flujo (disminución) ocurre

¹En lugar de comparar los tiempos con la finalidad de retardar el cambio del carril izquierdo al derecho (como lo proponen W. Knospe et. al (Knospe, et al., 1999)) es posible hacer uso de una variable de holgura *offset* en el criterio incentivo (por ejemplo, $v_i + offset < d_i^s$).

²Con este valor, se comprobó que se reproducen bien fenómenos del tránsito real

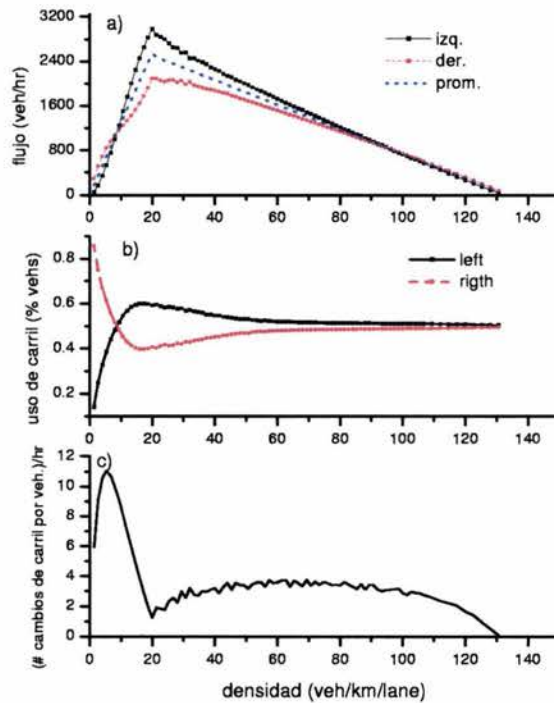


Figura 3.4: Resultados de la simulación con reglas asimétricas y vehículos homogéneos (misma velocidad límite) para $L = 10,000$ celdas, $R = 0.2$, y $\alpha = 0.75$. En (a), se muestra el diagrama fundamental: se observa que el rompimiento del flujo se produce primero en el carril izquierdo, mientras que en el carril derecho este se mantiene durante un rango de densidad, antes de que se descomponga. En (b) se muestra el diagrama correspondiente al uso de carril con respecto a la densidad, se observa como la densidad de máxima inversión está en acuerdo con la densidad de flujo máximo. Por último en (c) se muestra el número de cambios de carril por vehículo, en una hora.

primero sobre el carril izquierdo que en el derecho. Una vez que el flujo máximo ha sido alcanzado, nuevamente más vehículos intentan regresar al carril derecho hasta que el flujo se distribuye eventualmente en ambos carriles.

El comportamiento antes descrito se debe a la inversión de uso de carril, la cual se muestra en la Figura 3.4b. El razonamiento para esta inversión de uso de carril es el siguiente. En densidades pequeñas, la mayoría de los vehículos conducen sobre el carril derecho. Sin embargo, como una consecuencia de la prohibición de rebase sobre el carril derecho, más vehículos evitan conducir sobre el mismo con el incremento de la densidad y por lo tanto más vehículos se cambian al carril izquierdo. Es importante mencionar que en el modelo descrito, la posición del punto de inversión, donde se invierten las densidades de los carriles, se controla principalmente por t_h , mientras la extensión de la inversión del uso de carril (que tanto se separan las densidades) se controla mediante t_p^h . Note

que con el incremento de la densidad, los vehículos se distribuyen eventualmente en ambos carriles.

Por otra parte, como se muestra en la figura 3.4c, el número de cambios de carril promedio, que un vehículo realiza en una hora, se decrementa significativamente en comparación con el modelo simétrico. Esto es consecuencia, principalmente, del retardo que se establece para que un vehículo regrese del carril izquierdo al derecho (con t^h y t_p^h). Aún más, el número de cambios de carril máximo se produce en la vecindad de la densidad donde la inversión de uso de carril ocurre. Note que con el incremento de la densidad se produce un decremento en la frecuencia de cambios de carril hasta que un mínimo local se observa en la densidad de flujo máximo. Este resultado de la simulación apunta a la existencia de estados coherentes, donde se mueven grupos de vehículos con velocidades semejantes, con interacciones cooperativas, que conducen a un fenómeno nuevo en el tránsito de carreteras que se observó recientemente en carreteras de Alemania (Helbing y Huberman, 1998). Este fenómeno consiste en que, a medida que la densidad de los vehículos aumenta, sus interacciones causan una transición a un estado altamente correlacionado, en el que prácticamente todos los vehículos se mueven con la misma velocidad; como en el caso de los pelotones en un solo carril (análogo al movimiento de un bloque sólido). Este estado se asocia con un número reducido de cambios de carril y un flujo estable, alto y seguro (Helbing y Huberman, 1998), que desaparece cuando la densidad vehicular excede un valor crítico (este efecto se ha observado en el tránsito de Dutch, Alemania (Helbing y Huberman, 1998)).

Hasta este momento, los resultados de simulación del modelo indican que, la consideración de vehículos homogéneos reproduce cualitativamente bien diversos fenómenos del tránsito real en carreteras multicarril. Sin embargo, en la realidad, el tránsito vehicular es en general heterogéneo, es decir, compuesto de diferentes tipos de vehículos. Por ello, se aplicó el modelo con reglas asimétricas para modelar una carretera con un 10% de camionetas y el resto de automóviles. La distinción entre los vehículos se hizo mediante la asignación de velocidades límites diferentes. La velocidad límite de las camionetas se estableció en 3 y la velocidad límite de los coches en 5.

En la Figura 3.5a) se muestra el uso de carril con respecto a la densidad para las camionetas, que se obtuvo mediante simulaciones del modelo heterogéneo. Note como los resultados muestran la *robustez* del modelo cuando se consideran vehículos lentos: Independientemente de la densidad, las camionetas se concentran más en el carril derecho que en el izquierdo. En densidades pequeñas, donde los congestionamientos no existen, las camionetas se concentran en el carril derecho (como pasa en la realidad). Con el incremento de la densidad las camionetas empiezan a cambiarse al carril izquierdo, pero a pesar de ello, el porcentaje de las camionetas siempre es mayor en el carril derecho que en el izquierdo. Además, en la figura 3.5b) correspondiente al uso de carril de coches con respecto a la densidad, se observa que la inversión de uso de carril para los coches se sigue produciendo, como en el caso homogéneo. Esto es un buen indicador de que se cumple uno de los objetivos del modelo: El flujo no se domina por la introducción de los vehículos lentos en el sistema, es decir, el porcentaje de vehículos lentos no se distribuye igualmente entre los carriles.

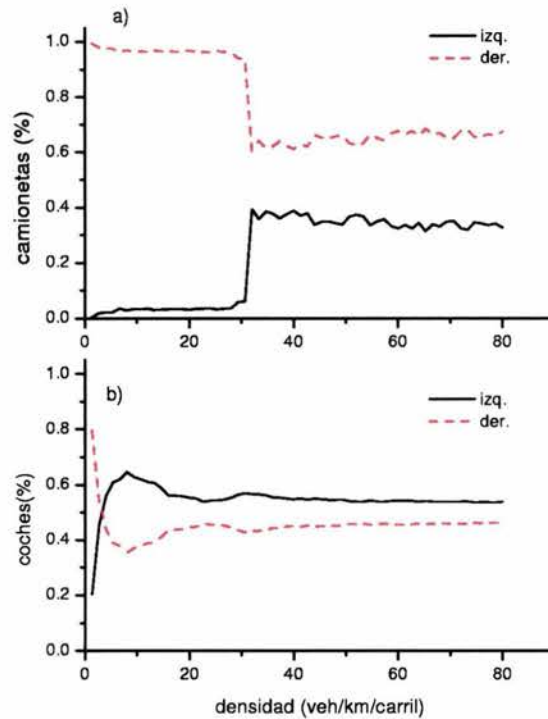


Figura 3.5: Gráfica de uso de carril con respecto a la densidad promedio por carril para el modelo asimétrico y 10% de camionetas. En (a) se muestran el porcentaje de camionetas sobre ambos carriles. Se observa que independientemente de la densidad la mayoría de las camionetas permanece en el carril derecho. En (b) se muestran el uso de carril para los automóviles. Se observa una inversión de uso de carril, en densidades bajas la mayoría de los automóviles están en el carril derecho, con el incremento de la densidad la mayoría se encuentra en el carril izquierdo.

Por otra parte, para ilustrar el comportamiento del flujo vehicular del sistema asimétrico heterogéneo, en la figura 3.6a se presenta el diagrama fundamental correspondiente. Note que el flujo sobre el carril derecho es más alto que sobre el carril izquierdo sólo antes de la densidad donde se produce la inversión de uso de carril de los vehículos (aprox. 5 veh/km, ver Figura 3.6b). Esto se debe a que la mayoría de los automóviles se encuentra en el carril derecho moviéndose libremente. Sin embargo, con el incremento de la densidad, la introducción de las camionetas ocasiona que más vehículos se cambien al carril izquierdo para evitarlas; como consecuencia, el flujo sobre el carril izquierdo se incrementa más rápidamente que el flujo sobre el carril derecho, hasta que el flujo máximo se alcanza. También es interesante notar que, debido a la introducción de camionetas, la capacidad (flujo máximo) del sistema se decremента ligeramente en comparación con el sistema homogéneo (como se observa en la figura 3.6c). Sin embargo, la densidad crítica del modelo heterogéneo se incrementa (en comparación con el modelo homogéneo) hasta una densidad donde las camionetas

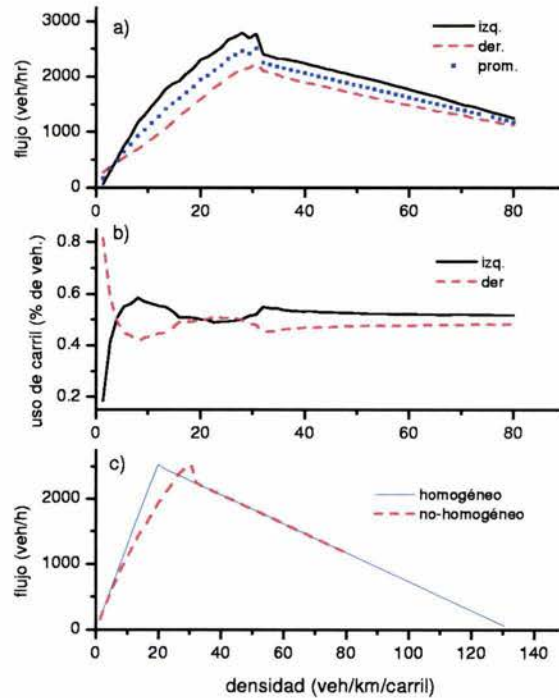


Figura 3.6: Resultados de simulación del modelo asimétrico con 10% de camionetas. En (a) se muestra el diagrama fundamental. En (b) se muestra el uso de carril independientemente del tipo de vehículo. Mientras que en (c) se muestra el diagrama fundamental en comparación con el caso de vehículos homogéneos.

todavía pueden moverse libremente, debido a su velocidad límite menor.

Al investigar las velocidades promedio dependientes de la densidad, de los coches y las camionetas, así como el número de cambio de carril de los vehículos, se infiere la presencia de un estado coherente, semejante al flujo de un bloque sólido, como los pelotones- v_{pl} que se observaron con el modelo de un solo carril. Hasta antes de una cierta densidad crítica, la velocidad promedio de las camionetas, en ambos carriles, se mantiene sin cambio, muy cercana a su velocidad máxima (ver las Figuras 3.7a y 3.7b). Mientras la velocidad promedio de los automóviles sea más alta que la velocidad límite de las camionetas, las camionetas sienten ligeramente el incremento de las densidades locales; debido a que el espacio existente en la carretera es suficiente para que las camionetas conserven velocidades cercanas a la límite. Entonces, en una densidad crítica (en 30 veh/km), la velocidad promedio de los coches decae significativamente hacia la velocidad de las camionetas (es decir, aprox. 80 km/hr). Esto produce el mínimo local que se observa en la diferencia de las curvas de las velocidades de la Figura 3.7c (línea punteada).

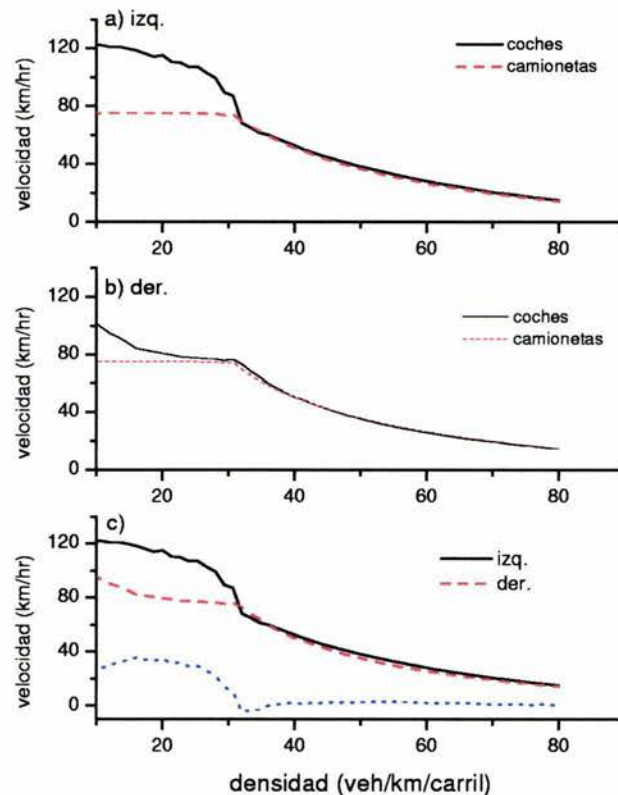


Figura 3.7: En (a) y (b) se muestra la relación de la velocidad promedio de los automóviles y las camionetas, con respecto a la densidad promedio, para el carril izquierdo y el derecho respectivamente. Además, también en (c) se muestra la diferencia de las velocidades, que indica un mínimo local.

Lo anterior origina que entre 30 y 32 veh/km , los vehículos se muevan en forma semejante a la de un pelotón (con velocidades semejantes, próximas a la velocidad límite de las camionetas). El espacio de la carretera se usa casi totalmente por la distancia segura de los vehículos, así que distancias suficientemente grandes para los cambios de carril, pueden sólo ocurrir si se varían intensamente las velocidades de los vehículos (para R grande). Aún más, debido a que en esta región de densidad, las velocidades de los vehículos y las camionetas son casi idénticas, el número de cambios de carril decae significativamente y se observa un mínimo local (ver la figura 3.8). Como consecuencia y sin oportunidad de rebasar, en esta densidad, todos los vehículos se deben mover coherentemente, con una velocidad promedio cercana a la velocidad límite de las camionetas. Posteriormente, el inicio de los congestionamientos vehiculares, después de este rango de densidad, produce que las distancias entre los vehículos varíen ampliamente, así que el rebase es nuevamente posible y el estado

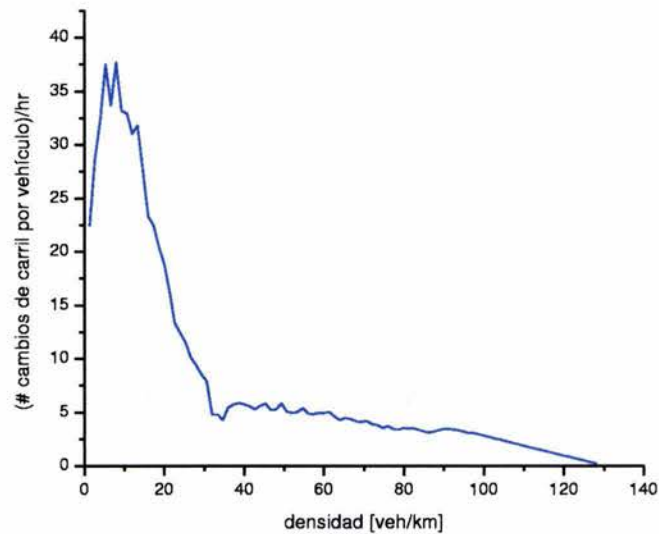


Figura 3.8: Número de cambios de carril por kilómetro en una hora, resultado del modelo asimétrico con 10 % de camionetas.

coherente se destruye. Por lo tanto, el número de cambios de carril se vuelve a incrementar (ver figura 3.8). Debido a este incremento, los coches que cambian de carril empiezan a interferir más con las camionetas, por lo que se observa que la velocidad promedio de las camionetas se empieza a decrementar con el incremento de la densidad y llega a ser cercana a la velocidad de los coches

En resumen, el modelo asimétrico presentado reproduce un efecto novedoso que se observó recientemente en el tránsito de carreteras (Helbing y Huberman, 1998), que consiste en la formación de un movimiento coherente. Este estado coherente del movimiento de los vehículos reduce considerablemente las fuentes principales de accidentes en carreteras: las diferencias en las velocidades de los vehículos y los cambios de carril. Este estado se asocia también con el flujo máximo en la carretera y justamente se localiza antes de la transición hacia un estado inestable del tránsito vehicular. Por lo tanto, en un nivel práctico, sería deseable implementar reglas del tránsito vehicular y diseñar controles de carretera que conduzcan al movimiento del tránsito semejante a un pelotón- v_{pl} . La formación de este estado coherente se podría respaldar por restricciones de cambio de carril dependientes del tránsito y límites de velocidad variables, o por sistemas de control de vehículos automáticos. Cabe mencionar que, el uso de reglas de cambio de carril asimétricas, donde la mayoría de las camionetas se mantienen en un carril y el rebase se considera sobre el otro carril(es), motiva a los conductores a evitar el carril de las camionetas, por lo tanto sería posible que la capacidad efectiva de las carreteras se redujera, en comparación con el uso de reglas simétricas.

3.5. Comentarios del capítulo

En este capítulo se presentó una extensión del modelo de tránsito vehicular con AC para un solo carril, que se definió en el capítulo dos. En particular, se definió un modelo multicarril mediante un conjunto de reglas de cambio de carril locales y simples, que conserva las reglas de actualización del modelo de un solo carril. En particular, se definieron reglas de cambio de carril simétricas (como las usadas en el tránsito urbano) y asimétricas (como las aplicadas en las carreteras en México). Todos los resultados se obtuvieron mediante simulación de computadora. Los resultados que se presentaron en este capítulo sugieren que el modelo propuesto es capaz de reproducir algunos fenómenos que se observan en el tránsito real de carreteras de dos carriles.

En particular, para el caso del modelo con reglas de cambio de carril simétricas, el diagrama fundamental refleja cualitativamente bien el desempeño del tránsito vehicular que se observa empíricamente. Además, el modelo reproduce las curvas de cambio de carril empíricas, es decir, dependientes de la densidad vehicular.

Por otra parte, los resultados del modelo con reglas de cambio de carril asimétricas reproducen muy bien la inversión de uso de carril semejante a la observada en el tránsito vehicular real sobre carreteras con reglas de cambio de carril asimétricas. Además, el número de cambios de carril de las simulaciones es dependiente de la densidad y también se asemeja al comportamiento empírico: un máximo se alcanzado cerca de la vecindad del flujo máximo y posteriormente, el número de cambios de carril se decrementa con el incremento de la densidad vehicular.

En particular, los resultados del modelo asimétrico, con diferentes tipos de vehículos (heterogéneo), son alentadores. Muestran que el modelo es robusto cuando considera vehículos lentos, esto es, el flujo no se domina por una pequeña fracción de vehículos lentos. Es importante mencionar que esto no se ha logrado con otros modelos basados en autómatas celulares. Además, los resultados de simulación apuntan a la existencia de estados coherentes, cooperativos, que se alcanzan de interacciones competitivas de los vehículos y que conducen a un nuevo fenómeno que se observó recientemente en el tránsito de carreteras (Helbing y Huberman, 1998). Conforme la densidad vehicular de los vehículos se incrementa, sus interacciones causan una transición dentro de un estado altamente correlacionado, en el que los vehículos prácticamente se mueven con la misma velocidad, análogo al movimiento de un pelotón. Este estado se asocia con un número reducido de cambios de carril de los vehículos y un flujo estable, alto y seguro. Este estado desaparece a medida que la densidad vehicular excede un valor crítico³.

Desde un nivel práctico estos resultados son importantes, para implementar reglas de tránsito y diseñar sistemas de control de carretera que conduzcan al movimiento del tránsito semejante al de un bloque sólido. Esto disminuiría una de las principales causas de accidentes: la variación de velocidad de los vehículos y los cambios de carril constantes. Desde luego que para lograr este estado

³Efecto que se observó en evaluaciones recientes del datos del tránsito en Holanda

coherente se requiere tomar en cuenta otras medidas adicionales.

En conclusión, el modelo de multicarril que se presentó en este capítulo es capaz de reproducir varios fenómenos observados en el tránsito real. Aún cuando en éste capítulo sólo se presentaron resultados para carreteras de dos carriles, el modelo puede aplicarse forma semejante a carreteras donde el número de carriles es mayor, como se verá en el capítulo siguiente.

Capítulo 4

Simulación de estados transitorios en la autopista México-Cuernavaca

4.1. Introducción

El conocimiento del flujo vehicular en una red carretera permite estimar el grado de ocupación y las condiciones en que opera cada segmento de la misma. El análisis de su evaluación histórica permite definir las tendencias de crecimiento y el momento a partir del cual ciertos segmentos dejarán de prestar un servicio adecuado, convirtiéndose en el cuello de botella del transporte y por lo tanto, estancan el desarrollo en lugar de seguir propiciándolo.

Una adecuada auscultación del tránsito de una red resulta así fundamental para su operación, mantenimiento y desarrollo; es por lo tanto, un insumo indispensable para la planeación de todas las actividades a realizar en la red. En lo que a la infraestructura respecta, permite apoyar la asignación de tránsito en los nuevos segmentos propuestos, así como definir sus características geométricas y estructurales. En los segmentos existentes permite priorizar las necesidades de mantenimiento, definir el momento de las modernizaciones o reconstrucciones y señalar la necesidad de rutas alternas.

En lo que a la operación respecta, el conocimiento del flujo vehicular permite comparar la oferta de servicio con la demanda existente y realizar análisis operacionales que orienten el encauzamiento del tránsito y el desenvolvimiento de la red.

En México, por ejemplo, de acuerdo con los reportes de la Policía Federal de Caminos, la autopista México-Cuernavaca presenta un alto índice de flujo vehicular en periodos vacacionales y días de asueto. Esto ocasiona que la carretera se congestione y el tiempo de recorrido aproximado se incremente notablemente. Sin embargo, estos congestionamientos no se registran en días laborales, en los que la carretera opera en estado de flujo libre, si no se registran incidentes en la carretera que ocasionen lo contrario. Esto último es consistente con datos medidos por el Instituto Mexicano del Transporte, que reportan que el tránsito diario promedio anual (TDPA) de esta autopista no es mayor de 15,000 vehículos (IMT, 2000); que indica un nivel de servicio adecuado. Desde luego que este reporte contrasta con el nivel de servicio en días de asueto, donde la calidad de vida de los usuarios de la autopista se deteriora debido a un mayor tiempo de viaje (de hasta un 100% más) y por lo tanto, un mayor consumo de combustible, accidentes y la consecuente contaminación.

Con la finalidad de ayudar a aclarar las causas de los congestionamientos producidos en la autopista México-Cuernavaca en días de asueto y sus posibles soluciones, en este capítulo se aplica modelo multicarril de AC con anticipación que se definió en el capítulo anterior (con una estimación cautelosa) para simular esta autopista. Se presentará un análisis microscópico e independiente para cada sentido de la autopista. Además, se mostrará como el modelo para sistemas de multicarril puede aplicarse a carreteras de más de dos carriles y conserva su simplicidad.

Por otra parte, hasta este momento, los resultados presentados han correspondido a sistemas con condiciones de frontera periódica. Sin embargo, las condiciones de frontera abierta son relevantes para muchas situaciones del tránsito, donde el número de vehículos puede variar constantemente con el tiempo. En el contexto de la modelación del tránsito vehicular, es interesante estudiar los efectos causados en el tránsito vehicular sobre un segmento de la carretera cuya densidad depende del flujo vehicular en sus fronteras, como por ejemplo, un segmento entre una rampa de entrada y una de salida o delimitado por casetas de cobro, como en el caso de la autopista México-Cuernavaca. Este tipo de segmentos se considerará para su modelación como un sistema abierto, debido a que los flujos en las fronteras determinan la densidad promedio del sistema.

Es importante enfatizar que para la modelación de la autopista en el caso del sentido México-Cuernavaca, no considerará la demanda real existente antes de la caseta (cola de espera). Sólo se modelará inmediatamente después de la caseta, es decir, se considerará el flujo máximo de entrada que CAPUFE permite, más no la cola de espera antes de la caseta.

Debido a que la autopista México-Cuernavaca cuenta con una rampa de entrada y una rampa de salida en cada sentido; por lo tanto, es necesario definir la modelación de las rampas de entrada y las rampas de salida para la simulación de la autopista, misma que presentamos en la siguiente sección. Con estas definiciones habremos generado los ingredientes para modelar las autopistas en México.

4.2. La modelación de las rampas

En esta sección se discute la implementación de las rampas de entrada y salida que se utilizan para la modelación de la autopista. Las rampas de entrada y salida se implementan como partes de la red conectadas, donde todos los vehículos existentes pueden entrar o dejar el sistema. La actividad de las rampas se caracteriza por el número de vehículos que entran q_{inr} (ó saliendo, q_{outr}) por unidad de tiempo. Cada paso de tiempo pueden adicionarse (o remover) vehículos en función de q_{inr} . Al considerar la estructura geométrica de la autopista, se seleccionó la longitud de las rampas como $L_{ramp} = 20$ celdas, en unidades de la constante de la red (identificada como 7.5 metros). La primera celda de la rampa de entrada (salida) se localiza en x_{on} (x_{off}).

La implementación de las rampas se asemeja a la estrategia de los vehículos que cambian del carril de aceleración al carril de conducción. Debido a que sólo se analizará una sección de autopista y no una red carretera, para adicionar vehículos se realiza una búsqueda sucesiva en la región de la

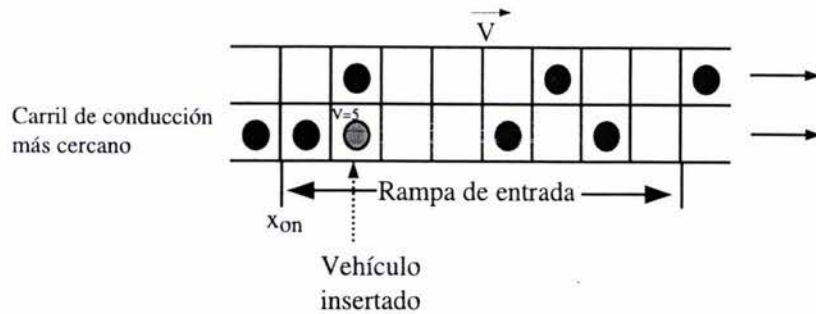


Figura 4.1: Esquema de la simulación de la rampa de entrada

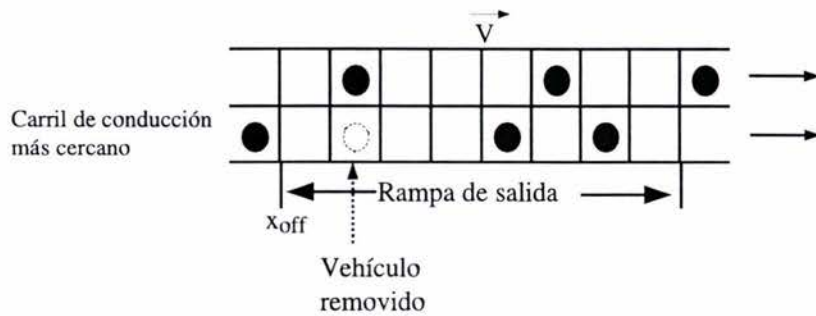


Figura 4.2: Esquema de la simulación de la rampa de salida

rampa de entrada (de x_{on} hasta $x_{on} + L_{ramp}$) hasta que se encuentra una celda vacante. Entonces un vehículo se insertará en esta celda, aún si la celda de enfrente ya está ocupada por un vehículo. La velocidad del vehículo se coloca a su velocidad límite v_{max} (dependiendo del tipo de vehículo). Cabe mencionar, que esta condición de inserción es posible en los modelos con AC debido a que la definición del proceso de desaceleración lo permite; sin embargo en la realidad, esto podría conducir a una perturbación severa del sistema, en dependencia de la densidad global. En la Figura. 4.1. se muestra un esquema de las simulación de la rampa de entrada.

Cabe mencionar que el método descrito para la modelación de las rampas implica un comportamiento de los conductores muy agresivos, porque en el proceso de cambio del carril de aceleración al carril de conducción aparentemente no se mantiene un margen de seguridad. Sin embargo, debido a las capacidades de desaceleración no acotadas de los vehículos en el modelo, esto no conducirá a accidentes.

Las rampas de salida trabajan en forma similar: se va sucesivamente a través de las celdas de la

red correspondientes a la región de la rampa de salida, hasta que una celda ocupada se encuentra. Entonces el vehículo que existe en esa celda se removerá de la misma, como se muestra en la Figura 4.2.

Desde luego que la modelación de las rampas conlleva a la adición de un sub-paso al modelo multicarril, mismo que se lleva acabo antes del sub-paso de cambio de carril. Así, la inserción y remoción de vehículos en las rampas es el primer sub-paso que se realiza cada paso de tiempo. Además, se restringe que un vehículo que se inserta en el carril de conducción en un tiempo dado, no podrá cambiarse a otro carril en ese mismo paso de tiempo.

4.3. La modelación de las fronteras

Por otra parte, no es posible simular el desempeño de la autopista México-Cuernavaca si se utiliza una topología de anillo, debido a la existencia de la caseta. Es necesario aplicar el modelo sobre un sistema con condiciones de frontera abiertas, donde el flujo que entra o sale en las fronteras determina el desempeño del mismo. Por lo tanto, en esta sección se definirá la forma en la que se modelarán de las fronteras del modelo.

Primeramente, es importante decir que para cada sentido de la autopista se define una velocidad con la cual entran los vehículos a la autopista, que aquí se le llamará v_{en} . En particular para el sentido México-Cuernavaca (S1), la velocidad de entrada de los vehículos se establece en uno, debido a que entran en la caseta. Mientras que para el sentido Cuernavaca-México (S2), la velocidad de entrada de los vehículos es su velocidad límite (misma que se establece con base al tipo de vehículo, tres para vehículos lentos, cinco para vehículos rápidos). Además, para cada sentido se modela en el sentido del flujo: así para el sentido S1 inicio es después de la caseta de Tlalpan y su fin la llegada a Cuernavaca, mientras que para el sentido S2 su inicio es la salida de Cuernavaca y su fin la llegada a la caseta de Tlalpan. Al inicio y fin de cada sentido se les llamará frontera izquierda y frontera derecha, respectivamente. Con base en estas consideraciones, es posible definir la simulación de las fronteras.

Para cada carril, adicional a sus L celdas que lo conforman, se expande su frontera izquierda a un mini-sistema de $v_{en} + 1$ celdas (ver la Figura 4.3, que corresponde al sentido S2). Esto se realiza con la finalidad para proveer una estrategia de inserción adecuada a la definición del modelo de AC como se definió en el capítulo anterior, que permita investigar un espectro amplio de los posibles estados del sistema. Sin embargo, se enfatiza que no es la única manera de realizar simular la frontera, sólo es una buena alternativa para el modelo. El contenido de la frontera izquierda (mini-sistema) se debe cambiar cada paso de tiempo, antes de que se realicen los cambios de carril y se actualicen las velocidades de los vehículos. El procedimiento de cambio consiste de dos pasos. Primero, si existe un vehículo en una celda del mini-sistema, éste se debe remover (no pudo entrar un vehículo en el paso anterior, que sería semejante a esperar en una cola).

Entonces, un vehículo con velocidad límite (esta depende del tipo de vehículo que entra y el

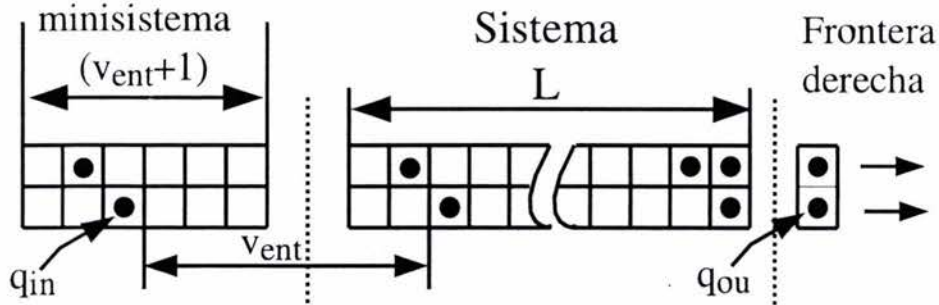


Figura 4.3: Representación esquemática de la modelación de las fronteras para el sentido S2

sentido que se simula) se inserta en el minisistema con una probabilidad q_{in} . Para determinar q_{in} , sea q_r el flujo de entrada real que se permite en la autopista (en km/hr) y sea $T=3600$ s. Entonces, la probabilidad de insertar un vehículo en la frontera cada segundo será,

$$q_{in} = q_r/T$$

Se debe enfatizar que se decidió utilizar esta probabilidad uniforme debido a que no se modelan colas de espera. Sin embargo, para casos más complejos existen muchas alternativas de distribución del flujo de entrada. Cada paso de tiempo de la simulación, la probabilidad q_{in} se agrega a una variable E (inicialmente en cero), cuando E es mayor que uno, entonces un vehículo se colocará en el minisistema e intentará entrar en el proceso de movimiento al sistema principal. Si el vehículo entra, E se decrementa en una unidad.

La posición de un vehículo en el minisistema tiene que satisfacer las siguientes condiciones: (i) la distancia al primer vehículo en el sistema principal es al menos igual a la velocidad máxima v_{max} del vehículo que entra, y (ii) la distancia al sistema principal tiene que ser la mínima, es decir, si ningún vehículo está presente en el sistema principal dentro de las primeras v_{max} celdas, la celda más a la derecha del minisistema (primera) se ocupa. Esto permite que los vehículos del minisistema que se insertan en el sistema principal continúen moviéndose con velocidad máxima en tiempos posteriores y corresponde a un patrón de flujo máximo del modelo.

Por otra parte la frontera derecha se simula mediante la adición de una sola celda ligada al final del sistema. El cambio se aplica en forma similar al caso de la frontera izquierda, antes del procedimiento de cambio de carril y la actualización de las velocidades de los vehículos. Primera-

mente, se limpia la frontera derecha de todos los carriles (si es necesario) y entonces se ocupa con probabilidad $1 - q_{out}$, donde q_{out} corresponde al número de vehículos que salen por segundo. La probabilidad q_{out} del sentido México-Cuernavaca siempre es uno, no se aplican restricciones de entrada de los vehículos a Cuernavaca (nunca se ocupa la celda de frontera). Mientras que para el sentido Cuernavaca-México, la probabilidad q_{out} se calcula de manera semejante a la probabilidad q_{in} , sólo que q_r se refiere al flujo vehicular que se permite entre a la caseta cada hora. Durante el proceso de movimiento, todos los vehículos cuya velocidad es suficiente para alcanzar la celda de frontera se remueven del sistema, si la celda de la frontera derecha está vacía. Es importante aclarar que la celda de la frontera derecha se considera en la aplicación de las reglas de cambio de velocidad, que para el caso del sentido S2, permite modelar la restricción de entrada al Distrito Federal mediante la caseta de peaje.

4.4. Resultados de simulación

Para simular la autopista México-Cuernavaca con el modelo multicarril se utilizó una red de un sistema abierto (como es la autopista), es decir, donde los vehículos entran por la frontera más a la izquierda en sentido contrario del flujo vehicular y dejan el sistema al sobrepasar la frontera más a la derecha en el sentido del flujo vehicular; por lo tanto, la densidad vehicular no se mantiene en el tiempo. Se consideraron dos tipos de vehículos en función de su velocidad límite, es decir, vehículos lentos y rápidos. La velocidad máxima de los vehículos lentos y los rápidos es $v_{max} = 3$ y $v_{max} = 5$, respectivamente. Se mantuvieron los mismos valores para el tamaño de una celda y el paso de tiempo, como aquellos que se utilizaron en la definición del modelo multicarril, es decir, 7.5 m y $\Delta t = 1$ s respectivamente. Con base en datos tomados de CAPUFE, se estableció un 20% del flujo vehicular de entrada, como vehículos lentos. Además, debido al acuerdo de datos de simulación con la curva empírica del diagrama fundamental para vehículos manuales, los valores para los parámetros R y α que se utilizaron fueron $R = 0.2$ y $\alpha = 0.75$.

La simulación se realizó independientemente para cada sentido de la autopista. El número del sentido se estableció de acuerdo a CAPUFE: México-Cuernavaca, sentido uno (S1); Cuernavaca-México, sentido dos (S2). Para ambos sentidos, el número de celdas por carril L , se obtuvo con base en la longitud de la carretera. Esto es

$$L = \text{Longitud del circuito (m)} / \text{longitud de la celda} \quad (4.1)$$

En particular, la longitud de la autopista en sus dos sentidos, a partir de la caseta de cobro hasta la llegada a Cuernavaca y viceversa es de aproximadamente 57 kilómetros.

En lo que respecta a las probabilidades de flujo de entrada, como ya se mencionó, éstas se establecieron tomando en cuenta el número de vehículos que se permite entren en la caseta (o salgan), cada segundo. En particular, en lo que respecta al flujo vehicular de entrada, estas probabilidades se agregan cada paso de tiempo, cuando su valor es mayor que uno entonces se intenta insertar un

vehículo al sistema; si se inserta con éxito se decrementa en uno el valor agregado (esto indica que se insertó un vehículo). Este proceso también se aplicó para las rampas.

Para cada sentido, se calculó la velocidad local, \bar{v}_{loc} , y el flujo vehicular, q , en secciones específicas de la autopista para carril existente en la misma. La densidad local se determinó mediante la relación $\rho_l = q/\bar{v}_{loc}$. Las secciones de cada sentido se establecieron con base en el número de carriles y/o segmentos peligrosos (curvas).

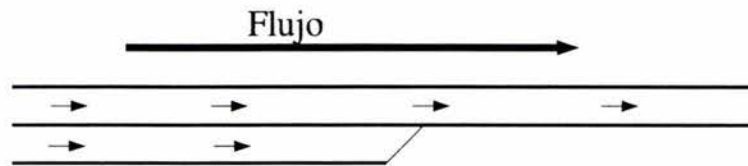


Figura 4.4: Esquema de la reducción de carril

Es importante mencionar, que se acudió a las oficinas de CAPUFE (Caminos y Puentes Federales) en Cuernavaca, con la finalidad de conseguir algún esquema de la autopista. Sin embargo, nos informaron que no se contaba con alguna ilustraciones. La única información que CAPUFE proporcionó corresponde a un prontuario anual (CAPUFE, 2000), mismo que sólo incluye los carriles por kilómetro (sumados en los dos sentidos), pero no especifica curvas. Por otra parte, el INEGI cuenta con cartas cartográficas de la autopista, pero en ellas no se especifica el kilometraje. Por tal motivo, acudió a la autopista y se obtuvo un esquema aproximado de la misma, por kilómetro (número de carriles, entronques, reducciones, ampliaciones, curvas). Mismo que se utilizó para definir la estructura esquemática de la autopista que se usó en la simulación.

En lo que respecta a la modelación de las reducciones de carril, siempre se reduce el carril de más a la derecha en el sentido del flujo vehicular (se bloquea el carril), como se muestra en la Figura 4.4. Las ampliaciones de carril por lo tanto, se realizaron hacia la derecha, tomando como referencia el sentido del flujo, ver Figura 4.5). Además, en la simulación se permitió que los vehículos se cambiaran al carril izquierdo contiguo, cumpliendo únicamente el criterio de seguridad, sólo si se ubicaban 150 metros antes de que el carril actual se redujera. Respecto al cambio de izquierda a derecha a un carril que se va a reducir, aún cuando los vehículos cumplieran los criterios de seguridad e incentivo, el cambio no se permitió si las celda objetivo se encontraba dentro de los 150 metros anteriores a la reducción. Con las condiciones descritas se intentó evitar variaciones de velocidad.

Una vez descrita la forma en que se llevaron a cabo las simulaciones, en las siguientes subsecciones se presentarán los resultados de simulación que se obtuvieron para cada sentido de la autopista.

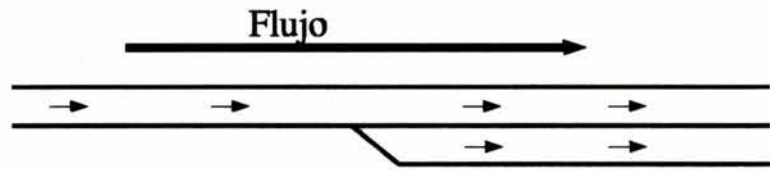


Figura 4.5: Esquema de la ampliación de carril

4.4.1. Sentido México-Cuernavaca

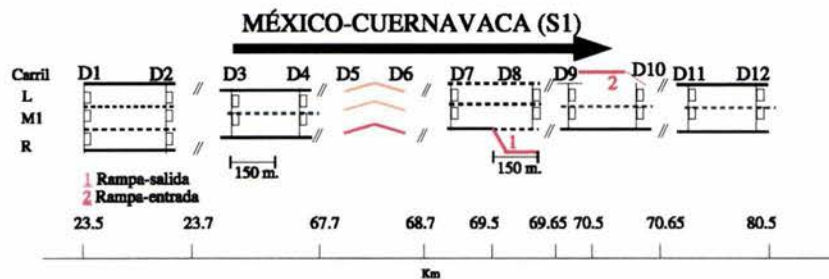


Figura 4.6: Esquema del sentido uno: México-Cuernavaca

En la Figura 4.6 se muestra el esquema correspondiente al sentido México-Cuernavaca, mismo que se dividió por secciones con base a por ejemplo, el número de carriles. Para la simulación, en la sección de la curva llamada "la pera", se establece una velocidad máxima para los vehículos rápidos y lentos de 75.6 Km/hr (3) y 48.6 Km/hr (2), respectivamente.

Cada vez que entra un vehículo a la carretera, se asignan al azar entre los carriles iniciales en la caseta, con una velocidad $v = 1$ (ya que es el inicio de la autopista). Posteriormente, a los vehículos existentes se les aplica las reglas de cambio de carril y velocidad del modelo multicarril.

De acuerdo a información proporcionada por la Policía Federal Preventiva (publicada en medios de comunicación), el flujo vehicular máximo que se ha registra por la caseta de cobro (en días de asueto) es de 3000 veh/hr, es decir 50 veh/min. Así, se realizaron simulaciones para el flujo de entrada principal $q_r = 2000, 3000$ y 4000 veh/hr, y se consideró que no se producen accidentes en carretera. Por otra parte, para determinar los flujos de entrada y los flujos de salida de las rampas, se tomó en cuenta la información de los datos viales publicados por el IMT (IMT, 2000). De esta forma, se estableció el flujo de la rampa de entrada como un 5% del flujo q_r y el flujo de la rampa

de salida como un 20% del flujo total q_r .

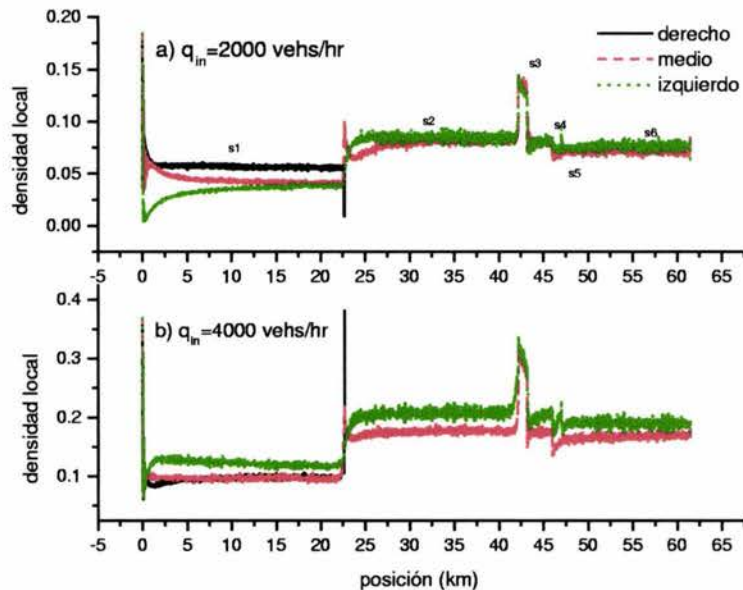


Figura 4.7: Gráfica de la densidad promedio con respecto a la posición a lo largo de la carretera. En a) se muestra la gráfica para $q_{in} = 2000$ veh/hr. El comportamiento de la densidad para $q_{in} = 4000$ veh/hr es mostrado en b)

En la Figura 4.7, se muestra la densidad promedio a lo largo de la autopista, para $q_{in} = 2000$ (a) y $q_{in} = 4000$ veh/hr (b)). Note que nunca se produce un incremento de densidad suficiente para generar un congestionamiento, aún para un flujo vehicular alto. La densidad máxima se detecta en la curva de la pera, debido a que los vehículos deben disminuir su velocidad. Sin embargo, inmediatamente después de esta sección, los vehículos recuperan su velocidad. Esto concuerda con observaciones empíricas que se han registrado en la autopista. El sentido uno nunca se congestiona con el flujo máximo que se permite entre en la caseta, al menos que un incidente o bloqueo ocurra en la carretera.

Aún cuando no se consideraron incidentes carreteros para la obtención de los resultados que se muestran en este trabajo, es posible simular éstos con el modelo, en forma muy sencilla; por ejemplo, si se colocan vehículos que permanecen en una posición con velocidad cero. Además, la complejidad computacional no se incrementa. Ésto sugiere la habilidad del modelo para capturar aspectos dinámicos del tránsito vehicular, que podrían ser de gran utilidad para tomar decisiones en situaciones de bloqueo en la carretera.

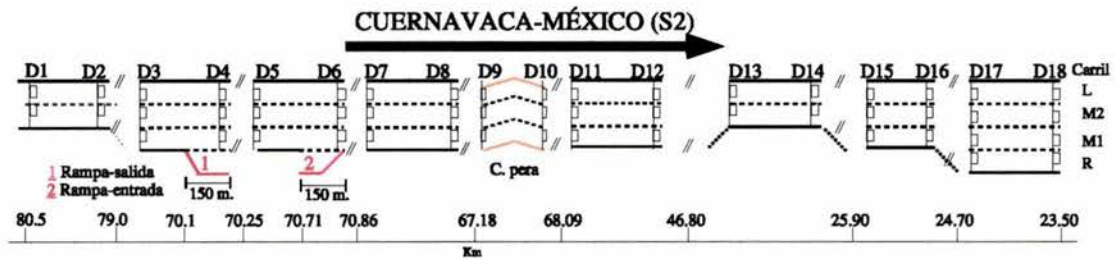


Figura 4.8: Representación esquemática del sentido dos de la autopista: Cuernavaca-México.

4.4.2. Sentido Cuernavaca-México

El sentido dos (ver Figura 4.8), que corresponde a la dirección Cuernavaca-México es uno de los más interesantes de analizar. En días de asueto el alto flujo que se registra en la llegada a la caseta ocasiona que se produzcan congestionamientos, que se propagan en sentido contrario al flujo vehicular a lo largo de la carretera. Desde luego, que el tiempo que se requerido para llegar a la ciudad de México se incrementa hasta un 100 %.

Para este sentido, el flujo que se estableció para la rampa de entrada es un 20% del flujo de vehicular que sale de Cuernavaca, q_r y el flujo de la rampa de salida se estableció como un 5% de q_r .

Para este sentido además de las restricciones de velocidad límite en la sección de la pera, también se estableció una velocidad límite menor en la zona de curvas (10 km) anterior a la llegada a la caseta. Las velocidad límite de los vehículos rápidos y los lentos en esta zona se estableció en 4 y 2 respectivamente.

A diferencia del sentido uno, donde los vehículos llegan libremente a Cuernavaca, en el sentido dos la caseta restringe la salida de la autopista de los vehículos y por lo tanto, como se mostrará en los resultados, es un factor determinante del estado del tránsito vehicular. En días de asueto, la policía federal preventiva ha reportado 3000 veh/hr, que se permiten sobrepasen la caseta de entrada al Distrito Federal. Con este registro se han observado grandes congestionamientos a lo largo de la autopista. Sin embargo, estos congestionamientos no se producen durante un día completo; éstos suceden sólo en ciertas horas picos. Con estas observaciones, se decidió simular un estado de la carretera, donde el flujo de los vehículos que salen de Cuernavaca q_r , varía en el tiempo. La simulación correspondiente, que aquí se le llamará transitoria, se llevó a cabo en diferentes periodos de tiempo descritos en el Cuadro 4.1.

En la simulación transitoria, la probabilidad de flujo de salida se mantiene siempre fija, $q_{out} = 0.833$, que es la correspondiente a 3000 veh/hr. Desde luego que esta probabilidad se divide entre el número de carriles existentes al llegar a la caseta. Primeramente, se inicia la simulación con un flujo de vehículo saliendo de Cuernavaca de 2000 veh/hr ($q_{in} = 0.555$) flujo que se mantiene durante

Cuadro 4.1: Un ejemplo de variación del flujo en el tiempo

Periodo	Duración	q_r
1	60 mins	2000 <i>veh/hr</i>
2	15 mins	2500 <i>veh/hr</i>
3	15 mins	3000 <i>veh/hr</i>
4	60 mins	3500 <i>veh/hr</i>
5	60 mins	3000 <i>veh/hr</i>
6	30 mins	2500 <i>veh/hr</i>
7	110 mins	2000 <i>veh/hr</i>

$L * 10$ pasos de tiempo (para que el modelo llegue a un estado permanente). Una vez que el estado permanente se alcanza, el flujo vehicular que sale de Cuernavaca (vehículos que entran al sentido de la autopista simulado) se varía con base en los periodos de tiempo que se muestran en el cuadro 4.1. Note que el tiempo agregado de los diferentes periodos corresponde a un periodo total de 6 hrs; si se considera que de acuerdo a observaciones, en días de asueto las horas pico se producen entre las 16:00 y las 22:00 hrs.

En particular, para el sentido S2, las variables del tránsito se promediaron en periodos de 5 mins. y se calcularon en dieciocho posiciones específicas de la carretera que simulan detectores a lo largo de la carretera, que se nombran D1...D18 (ver Figura 4.8).

En la Figura 4.9a, se muestra la densidad promedio local con respecto al tiempo para el detector D2 (eje izquierdo). El tiempo del eje horizontal corresponde a los minutos transcurridos a partir de las 16:00 hrs. El eje derecho ilustra las variaciones del flujo por periodo de tiempo. Note que la densidad fluctúa en función del incremento del flujo de entrada. Las perturbaciones del flujo de entrada se propagan hacia adelante a las demás secciones de la carretera a tiempos posteriores. Esto puede ser observado en la Figura 4.9 b) correspondiendo a la posición D10 al final de la curva de la pera. Claramente, se observa que hasta el minuto 75, el sistema se entera del primer incremento del flujo llevado a cabo al minuto 60 y hasta el minuto 90 se entera del flujo vehicular del tercer periodo. Estos resultados indican que los vehículos en la sección de la pera tardan aproximadamente 15 mins. en sentir el incremento del flujo de entrada. Note que un incremento en la densidad vehicular aparece en esta sección de la pera cuando el flujo vehicular se incrementa; sin embargo, inmediatamente después de esta sección la densidad vuelve a ser pequeña (flujo libre).

Por otra parte, en la Figura 4.10a, se muestra la densidad promedio en la posición D17, es decir, exactamente antes de la caseta. Nótese, que hasta el minuto 135 esta sección se entera del incremento del flujo vehicular saliendo de Cuernavaca. Claramente se observa que en el minuto 140 se produce un congestionamiento vehicular. Este congestionamiento se produjo por el flujo tan bajo de vehículos que se permite entren en la caseta y la curvas existentes antes de llegar a la caseta. El razonamiento para este desempeño es el siguiente. Cuando el alto flujo vehicular se siente en la

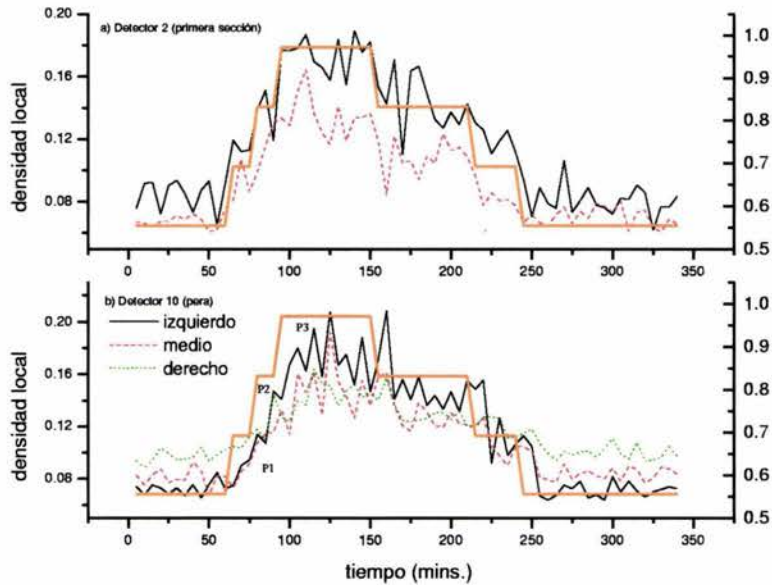


Figura 4.9: Densidad local promediada cada cinco minutos con respecto al tiempo. El tiempo son los minutos transcurridos a partir del primer periodo. El eje derecho ilustra la variación del flujo de entrada en el tiempo. a) La densidad en D2. b) Corresponde a la densidad calculada en D10 (la pera)

caseta, un congestionamiento se produce debido a la baja probabilidad de que un vehículo entre en la caseta; entonces el congestionamiento se propaga hacia atrás, que debido a la topología de la carretera no permite una recuperación del flujo libre (como puede observarse en la Figura 4.10b de la posición D15). Este razonamiento se infiere de los resultados, note de la Figura 4.10b como un congestionamiento se detecta al tiempo 155, es decir, 15 minutos después de que ocurrió el congestionamiento que se observa en D17, esto indica que una onda de choque que resulta de la caseta se propaga en dirección opuesta al flujo vehicular.

Es importante enfatizar que en la simulación, los valores de los parámetros del modelo se determinaron en función de las observaciones reportadas de la autopista. No existe información ni en CAPUFE y ni en el IMT para días de asueto. Sin embargo, el tipo de análisis microscópico como el que se realizó en este trabajo, puede ser útil en la planeación del diseño y manejo del flujo en una carretera. Por ejemplo, podría servir como un indicador del tiempo disponible para iniciar labores que eviten los congestionamientos observados, o bien, detectar niveles de servicio para días de asueto, mismo que no puede obtenerse del tránsito diario promedio anual.

Por otra parte, también se realizaron simulaciones con una probabilidad $q_{out} = 1$, es decir, semejante a que la caseta de peaje no existiera. Los resultados obtenidos indican que, aún con un flujos vehicular saliendo de Cuernavaca de 3000 *veh/hr*, el tránsito vehicular resultante presenta

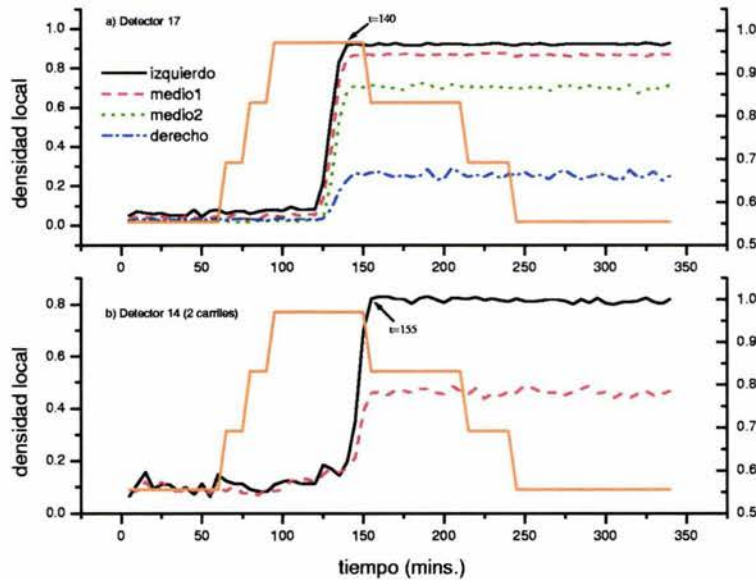


Figura 4.10: Densidad local promediada cada cinco minutos con respecto al tiempo. a) La densidad en D17; un congestionamiento se observa al minuto 140. b) La densidad en D14, note como el congestionamiento de D17 se propaga hasta esta sección al minuto 155

un estado de flujo libre. Desde luego, no se consideró el tránsito urbano después de la caseta. Los resultados hacen suponer que el problema existente en la llegada a Tlalpan, no solamente depende del diseño de la carretera. Se requiere un sistema de cobro más eficiente para evitar los congestionamientos que se observan cerca de la caseta y que evitar que se propaguen hacia atrás; como sucede en días de asueto. Además, es necesario realizar estudios microscópicos de las carreteras, que en conjunto con estudios macroscópicos del tránsito vehicular garanticen un desempeño y uso eficiente de las mismas.

Por último, los resultados que se presentaron son sólo una aproximación y se centran en un tipo de aplicación. Sin embargo, es posible considerar casos más complejos, con modificaciones simples al modelo.

4.5. Comentarios del capítulo

En este capítulo se aplicó el modelo de multicarril basado en AC para investigar el desempeño de la autopista México-Cuernavaca. Aún, cuando ciertas secciones de la carretera se integran hasta de cuatro carriles, el modelo se aplica eficientemente, y mantiene su simplicidad.

Es importante mencionar que para simular la autopista fue necesario recorrer la autopista en sus dos sentidos con la finalidad de obtener un esquema promedio de la misma. Caminos y puentes

federales, no proporcionó información al respecto donde se especificaran las velocidades límite y el comienzo de curvas (datos importantes para la simulación).

Los resultados de la simulación concuerdan con las observaciones que ha reportado la Policía Federal Preventiva en días de asueto. En lo que respecta al sentido México-Cuernavaca, aún cuando se considera el flujo vehicular máximo que se ha registrado en la caseta en días de asueto, se encontró que nunca se produce un congestionamiento, siempre que no se produzcan incidentes en la carretera que alteren la topología de la carretera. Por lo tanto, los congestionamientos sólo son posibles si se obstruye alguna sección de la carretera, o bien, la llegada a Cuernavaca. El análisis indica que el desempeño de la autopista en este sentido de la autopista es adecuado.

En lo que respecta al sentido Cuernavaca-México de la autopista, su esquema es más complejo. Las diversas ampliaciones y reducciones de los carriles existentes a lo largo de la autopista y la topología misma, ocasiona que una perturbación pequeña genere un congestionamiento. Sin embargo, la principal causa de los congestionamientos que se observan se producen por la caseta de cobro. Los resultados de la simulación sugieren que además del diseño de la autopista, un mal sistema de cobro en la caseta ocasiona que se produzcan congestionamientos; estos congestionamientos se propagan hacia atrás y producen grandes colas intermitentes (con vehículos que paran y avanzan) en gran parte de la carretera. Este desempeño está en acuerdo con lo que muchos usuarios de la autopista han experimentado alguna vez en días de asueto, en las horas pico.

En resumen, se mostró la utilidad del modelo para capturar diversas estructuras microscópicas del tránsito vehicular en forma sencilla. Aún cuando se realizó la simulación de la autopista suponiendo que no existen incidentes, es posible simular situaciones más complejas (como accidentes), manteniendo la simplicidad del modelo. Además, un análisis microscópico de simulación, como que se presentó en este capítulo para la autopista México-Cuernavaca, podría ayudar a detectar las causas de los congestionamientos vehiculares y su posible solución. Por consiguiente, ayudar en la planeación de medidas emergentes.

Conclusiones

Pronosticar los impactos de las diferentes estrategias de conducción anticipada juega un papel esencial en la planeación del tránsito vehicular y la evaluación de nuevas alternativas para mejorar el desempeño de los sistemas de carretera existentes. En este trabajo se presentó e investigó una modificación del modelo NaSch (Nagel y Schreckenberg, 1992) para capturar mejor las reacciones de los conductores cuando se enfrentan a diversas situaciones del tránsito y mantener seguridad. Como resultado, se adicionó un parámetro ($\alpha \in [0, 1]$) en el proceso de desaceleración del modelo, que permite establecer una distancia de seguridad como función de la velocidad de los vehículos precedentes. Aún cuando en este trabajo, este parámetro se relacionó principalmente con el grado de agresividad de los conductores, se mostró también que éste puede ser útil para describir diferentes situaciones de tránsito manual, automatizado y mixto.

Mediante resultados de simulación del nuevo modelo en un sistema de un solo carril, con topología de anillo y vehículos homogéneos, se mostró la capacidad del modelo para reproducir la relación flujo-densidad, semejante a la que se ha observado en el tránsito real. En comparación con otros modelos basados en AC, los resultados que se obtuvieron reproducen más fielmente los datos de mediciones, como consecuencia de la consideración de la anticipación de la velocidad. En particular, para una estimación cautelosa de la velocidad de los vehículos precedentes, se encontró una buena concordancia cuantitativa de los datos de simulación con datos empíricos de una carretera en Canadá. Es importante considerar que en México no existen datos de mediciones para comparar los resultados de la simulación; no obstante, se debe considerar que aún cuando el desempeño del tránsito es distinto en cada país, los parámetros del modelo se pueden ajustar fácilmente.

Por otra parte, los resultados de la simulación que se obtuvieron para esquemas de conducción asociados a intensidades intermedias de anticipación intermedios, exhiben una separación de fase dentro de una región de flujo libre y una región con pelotones- v_{pl} , en un cierto régimen de densidad. En estos pelotones densos los vehículos se mueven con la misma velocidad v_{pl} y la distancia (en celdas) hacia adelante se desvanece. Se encontró que la velocidad del pelotón, v_{pl} se determina como función de la intensidad de la anticipación (la distancia segura deseada entre los vehículos) que se utilice. Resultados analíticos indican que estos estados son similares a los estados con velocidad homogénea, que se han observado en carreteras.

Esta formación de pelotones que se observó en un régimen mixto se puede relacionar con,

por ejemplo, los esquemas de pelotón para Sistemas de carretera Automatizados (SCA), donde los vehículos se mueven en grupo, con distancia muy pequeñas entre ellos, para incrementar la capacidad vehicular. Por lo tanto, los resultados que se obtuvieron ayudan a aclarar los efectos de la anticipación, que se codificó mediante el parámetro α . Valores de *alpha* más pequeños (intensidad de anticipación mayor) implican flujos e intervalos de densidades para flujo libre más grandes. Esto concuerda con, por ejemplo, el uso de ciertas estrategias de conducción anticipada para explotar el conocimiento de la velocidad del vehículo precedente y así, reducir la distancia entre vehículos, incrementar la capacidad y el intervalo de densidad para el régimen de flujo libre.

Por otra parte, el análisis realizado para la variación de la velocidad promedio en el tiempo indica que el modelo es capaz de reproducir el desempeño complejo, que algunas veces se observa en el tránsito vehicular, en densidades que corresponden a valores donde la congestión se empieza a formar. Aún más, el análisis de la variación de las velocidades de los vehículos individuales indica la importancia de establecer un esquema de anticipación de velocidad adecuado para el régimen de densidad existente. La intensidad de la anticipación debe determinarse con base en la densidad para proporcionar un uso de la carretera más eficiente y así mejorar la seguridad. La intensidad de anticipación más alta se debe considerar antes que su correspondiente densidad máxima para el régimen de flujo libre se alcance. Esta selección no sólo produce un tránsito con el flujo máximo, también con una variación de velocidades mínima. Una integración entre la capacidad y la seguridad como resultado del análisis de la variación de las velocidades de los vehículos podría ayudar a mejorar el desempeño del tránsito vehicular.

Las consideraciones hechas en este trabajo muestran la flexibilidad de la aproximación de autómatas celulares para problemas de flujo vehicular más complejos. Una modificación simple y natural de las reglas del modelo NaSch para considerar diferentes estrategias de conducción permite describir la formación de pelotones de vehículos que se mueven coherentemente como se ha observado algunos esquemas de automatización. Se piensa que los resultados para el modelo de un solo carril que se presentaron en este trabajo, son relevantes para establecer niveles de seguridad y anticipación, no sólo para SCA, también en el tránsito real.

Con la finalidad de simular situaciones del tránsito vehicular más reales, donde existen diferentes tipos de vehículos y se permite rebasar, se extendió el modelo de un sólo carril para modelar el tránsito de carreteras con varios carriles, para el tránsito vehicular manual. Se definieron reglas de cambio de carril simétricas (como en el tránsito urbano) y asimétricas (diferente criterio para cambiar del carril derecho al izquierdo y del carril derecho al carril izquierdo, como las normas viales lo establecen para las carreteras de México). El modelo se aplicó en la simulación de un sistema de dos carriles. En particular, la relación flujo-densidad que se obtuvo del modelo de reglas simétricas, con vehículos homogéneos, mostró un comportamiento semejante al que se ha observado empíricamente. Resultados de simulación para un sistema con reglas de cambio de carril asimétricas y vehículos heterogéneos, indican que el modelo reproduce varios fenómenos que ocurren

normalmente en el tránsito de carreteras de dos carriles, como la inversión de uso de carril, el número de cambios de carril en función de la densidad. Además, el modelo de varios carriles es capaz de reproducir la formación de estados coherentes, donde en una cierta densidad vehicular los vehículos se mueven en pelotones, con velocidades semejantes y la varianza de velocidad es mínima: fenómeno que se ha observado recientemente en carreteras de Alemania (Helbing y Huberman, 1998).

Desde un punto de vista práctico, los resultados que se obtuvieron para el modelo de dos carriles podrían ser importantes para la implementación de reglas del tránsito vehicular y el diseño de sistemas de control del flujo en carreteras que conduzcan al movimiento de los vehículos semejante al de un bloque sólido. Con estas alternativas se podría disminuir dos de las principales causas de accidentes en carretera: la variación de la velocidad de los vehículos y los cambios frecuentes de carril. Es importante enfatizar que para lograr este objetivo se requiere tomar en cuenta otras medidas adicionales.

Con base en los resultados que se obtuvieron para el modelo de de dos carriles, se aplicó el modelo propuesto para analizar el funcionamiento de la autopista México-Cuernavaca. La topología de esta autopista es más compleja que la de los modelos que se analizaron en este trabajo; sin embargo, el modelo se aplicó en forma satisfactoria. Cabe mencionar que sólo se simuló el flujo vehicular en las secciones correspondientes a partir de la caseta hasta la llegada a Cuernavaca. No se consideró la demanda vehicular antes de la caseta, ni la unión posterior a la autopista con la zona urbana, es posible simular casos más complejos pero no se consideraron en este trabajo.

Los resultados de simulación indican que el sentido sentido México-Cuernavaca nunca se congestionará, siempre que no exista un incidente en carreteras y se permita una llegada libre a Cuernavaca, como lo muestra la experiencia. Este comportamiento no siempre ocurre para el sentido Cuernavaca-México, donde en días de asueto se forma un gran congestionamiento vehicular, que se observa principalmente entre las 16:00 y las 22:00 hrs. Los resultados indican el problema reside no sólo en la topología de la carretera, que es más compleja en este sentido, el problema principal se genera debido a un sistema de cobro ineficiente en la caseta. Es importante que las autoridades consideren una integración entre las carreteras topología, el sistema para solución y su posible eficiencia; además se requieren estudios de las carreteras en horarios específicos y no promediadas a lo largo de un día para determinar la eficiencia de carretera. De los resultados presentados en este trabajo, se piensa que el modelo propuesto podría servir para explorar alternativas que permitan mejorar el desempeño del tránsito.

Como alternativas para el problema de cobro en la caseta, cabe mencionar que algunos países consideran que los sistemas de telepeaje son la solución, en estos sistemas el pago del peaje se realiza a distancia y sin detener el vehículo, que por lo tanto suprimiría la tradicional parada en las cabinas o en la vía automática tanto para entrar en la autopista como para salir de la misma. El telepeaje implica identificar al usuario en menos de un segundo, en las más variadas condiciones climatológicas y entornos desfavorables. Para ello el usuario ha de llevar un dispositivo llamado TAG

que le identifica, el cual es leído por el lector apropiado situado en el área de peaje. Se estima que un cobrador manual puede atender 250 vehículos por hora, mientras que un dispositivo de telepeaje podría operar hasta 1800 móviles por hora. En México no es fácil establecer este sistema de cobro, esto constituye un punto de conflicto claro, ya que si bien para las empresas supone una reducción en los costos de personal, algunos sectores critican esa medida ya que ocasiona la desaparición de puestos de trabajo; además que se requeriría proporcionar a los usuarios un buen sistema de pago en el que no se cobre una cuota mensual adicional al costo que implica el uso de la autopista (contrario al sistema IAVE actual). Quizás un sistema de cobro en el un conductor que va utilizar la autopista en sus dos sentidos pueda pagar el uso redondo, podría mejorar el desempeño de la autopista. Sin embargo, se requiere explorar cada mecanismo de cobro antes de afirmar una solución y en este trabajo no se realizó.

Además de la relevancia práctica del modelo presentado para los problemas del tránsito vehicular, en el trabajo también se mostraron aspectos físicos interesantes. Los resultados del modelo para un caso específico de fronteras abiertas, mostraron que es posible reproducir el desempeño de otros sistemas físicos mediante el modelo de autómatas presentado, en particular el desempeño del flujo granular.

En resumen, en este trabajo se presentó un modelo para simular el tránsito vehicular que se basa en autómatas celulares. El modelo es mínimo, ya que se requieren todas las reglas definidas para simular el tránsito vehicular. Los resultados de simulación ilustran que este modelo captura las características esenciales del tránsito vehicular del diagrama fundamental y preserva la simplicidad de los modelos de autómatas celulares que permiten simulaciones rápidas. Esta rapidez de simulación podrían probar ser útiles para la aplicación del modelo a redes de tránsito de escala grande.

Aunque en este trabajo no se consideraron vehículos con diferentes longitudes, es posible considerarlos con el modelo si se utiliza una resolución más fina para el tamaño de las celdas, que permitan aceleraciones más pequeñas y regulando la seguridad con el parámetro de anticipación.

Apéndice 1

Introducción

En los capítulos de esta tesis se han descrito transiciones de fase y en éste se describen estados de no equilibrio. Estos aspectos forman parte de estudios de sistemas físicos. En el siguiente capítulo, se ilustrará como la dinámica modelo propuesto para el tránsito vehicular tiene analogías con otros sistemas físicos, en particular con el flujo granular, como el de la arena. Este último capítulo mostrará las posibilidades de encontrar nuevos paradigmas en ciencia básica mediante el modelo propuesto en este trabajo para el tránsito vehicular.

En este apéndice se presentará una analogía mediante el uso de términos de física estadística, de resultados que se obtuvieron para condiciones específico del modelo de AC que se presentó en el capítulo dos, con el desempeño del flujo granular. El objetivo será mostrar que el modelo presentado en este trabajo para simular el tránsito vehicular, puede también utilizarse para describir otros tipos de flujos, como el que se observa en los flujos de los bancos de arena.

En particular, se utilizará un sistema con topología abierta, pero sin establecer restricciones en las fronteras. Es importante enfatizar, que desde un punto de vista teórico, es más interesante estudiar situaciones del tránsito vehicular que se inducen por los efectos en las fronteras, donde las restricciones del flujo permiten mantener una densidad promedio en el sistema; como en el caso de la aplicación que se realizó en la autopista México-Cuernavaca en el capítulo anterior. Sin embargo, como se mostrará en este capítulo, un análisis sin restricciones del flujo en las fronteras para el caso del modelo de AC se podría utilizar como un medio para determinar las posibles soluciones que se podrían obtener con base en la estado inicial del sistema y la probabilidad de frenado aleatorio que se establezca. Desde un punto de vista de la física, esto es importante, ya que indica que el modelo propuesto podría aplicarse para modelar otros fenómenos físicos.

Cabe mencionar que en sistemas abiertos, donde no se restringen las fronteras, la densidad promedio del sistema es siempre inversamente proporcional con la velocidad promedio. Resultado que se debe a que en promedio, el flujo que ingresa no restituye la densidad promedio y por lo tanto el flujo neto es una constante ($\text{flujo} = \text{densidad} \times \text{velocidad}$). Por lo tanto, a diferencia de los sistemas presentados en los capítulos previos, no es posible analizar este tipo específico de sistema en función del flujo promedio. En cambio es necesario considerar otros descriptores con la finalidad de caracterizar los estados permanentes de este tipo de sistemas, como se mostrará en la sección

siguiente (Lárraga, et al, 2002).

Resultados de simulación del sistema

Para llevar a cabo el análisis del sistema descrito en la sección anterior, se realizaron simulaciones extensivas del modelo de AC, para diferentes estados iniciales aleatorios del sistema. Para determinar estos estados se utilizaron diferentes valores iniciales para la densidad promedio (ρ_{ini}), la velocidad promedio y el parámetro de frenado aleatorio R . La velocidad de partículas (vehículos en tránsito vehicular) sólo toman valores entre 1 y $v_{max} = 5$ (no hay partículas en reposo). Se utilizó un valor de $\alpha = 0$, debido a que en el flujo granular es posible tener un grano después de otro moviéndose en grupo. Cada paso de tiempo, se introduce una partícula con velocidad máxima en la frontera izquierda y se remueven todas aquellas que exceden la frontera derecha.

Con la finalidad de considerar los efectos de tamaño en el desempeño de estos sistemas, las simulaciones se realizaron para $L = 400, 1,000$ y $10,000$, con $\rho_{ini} = 0.20$. También se consideró un tamaño del sistema $L = 400$ y $\rho_{ini} = 0.7$. Para cada valor específico de las variables se realizaron 50 ejecuciones de la simulación y los estados finales que se obtuvieron para cada ejecución se promediaron, con la finalidad de obtener un esquema de transición de los diferentes estados del sistema como función de las condiciones iniciales.

Como ya se mencionó, la consideración de un sistema abierto sin restricciones en la frontera, como el que se utilizó, no permite que los estados permanentes se determinen en función del flujo¹. Por lo tanto, para caracterizar los estados permanentes del sistema (soluciones) con base en las condiciones iniciales, se utilizan dos parámetros: uno que se relaciona con el parámetro de frenado R y otro relacionado con la densidad promedio del sistema.

Durante el análisis se encontró que para una densidad promedio inicial baja se obtienen diferentes estados permanentes, es decir, con diferentes densidades promedio finales. El valor de la densidad depende del valor del frenado aleatorio R . Por lo tanto, el desempeño promedio del sistema se determinó sobre conjuntos de diferentes condiciones iniciales. Este desempeño promedio (resultante de promediar sobre 50 ejecuciones) permitió obtener un diagrama para caracterizar los estados del sistema, como función de la densidad promedio final y el parámetro del ruido R . En la figura 1, se muestra el diagrama de transición como una función de la densidad promedio y el parámetro de frenado aleatorio R , para diferentes densidades promedio iniciales y tamaños del sistema L .

Note como la transición entre un estado de flujo libre ($\langle \rho \rangle \leq 0.25$) y un estado con flujo congestionado ($\langle \rho \rangle \geq 0.7$), es más abrupta para tamaños del sistema muy grandes o para estados iniciales del sistema con densidad promedio alta. En particular, sólo existen estados de tránsito libre o congestionado. Sin embargo, para densidades iniciales bajas o tamaños del sistema pequeños, se observa

¹La no restricción del flujo en las fronteras siempre conllevará a que la densidad promedio sea inversamente proporcional con la velocidad promedio, debido a que es posible que el flujo promedio que entra al sistema no sea suficiente para restituir la densidad, es decir, no hay un límite en el flujo que origine lo contrario

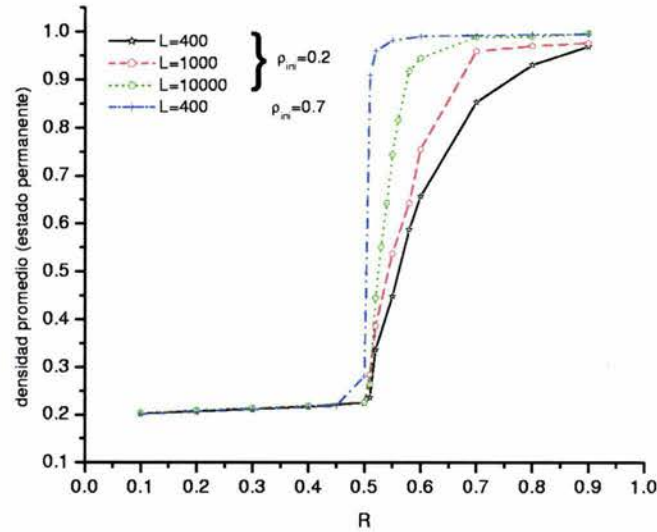


Figura 1. Gráfica de la densidad promedio en el estado permanente ρ , con respecto al parámetro de frenado R , para diferentes tamaños del sistema $L = 400, 1000$ y $10,000$, con $\rho_{ini} = 0.2$. Los datos para $\rho_{ini} = 0.7$ con $L = 400$ se muestran para comparación. Note la transición de un estado donde las partículas se mueven libremente a un estado congestionado, como función del parámetro R .

como la transición se produce en forma más gradual. En este último caso, es posible tener tres estados finales del sistema: flujo libre (densidad promedio baja), flujo congestionado (densidad alta) y flujo mixto ($0.25 < \langle \rho \rangle < 0.7$). En particular, la existencia del flujo mixto se debe a que siempre existen al menos una de las configuraciones (de las 50 promediadas) con estado final libre, aún para valores de R grande, esto ocasiona que el estado promedio se escape del congestionamiento y resulte en un estado con flujo de partículas intermedio.

Desde un punto de vista de la física estadística, se requieren dos temperaturas para determinar el comportamiento promedio de los sistemas como el que aquí se trata: Una temperatura que se relaciona con el parámetro R y otra temperatura que se relaciona con la densidad promedio resultante de los estados posibles del sistema. Esta descripción es semejante a la forma en que se describe el comportamiento del flujo en los medios granulares, como se mostrará en la siguiente subsección.

Analogía con los flujos granulares

Imagine que una caja con arena se somete a diferentes intensidades de vibración, que aquí se le llamará Γ , durante diferentes periodos del tiempo $\Delta\tau$, tal que después de cada periodo de tiempo $\Delta\tau$, existe un salto de la intensidad de la vibración $\Delta\Gamma$ a la próxima intensidad de vibración (?). En

este sentido, ya experimentalmente se encontró que, un ciclo de histéresis se puede trazar en términos de la densidad, del tamaño del cual este depende (Mehta y Barker, 1991; Stadler, et al., 2001) y sobre el radio específico $\Delta\Gamma/\Delta\tau$, que se conoce como *razón de rampa* del sistema. Para razones de rampa pequeños, es decir, donde cada valor de Γ se describe cuasicontinualmente y donde se le permite al sistema equilibrar cada valor de la intensidad de sacudido, el ciclo de histéresis es mucho más pequeño que en razones de rampa grandes (radios grandes). Con base en estas consideraciones se realizó una analogía del desempeño del flujo granular con resultados del modelo abierto de AC sin restricciones en la frontera:

Flujo Granular	Flujo del tránsito
Intensidad de vibración Γ	Inverso del parámetro de frenado $1/R$
Tiempo de espera	Tamaño efectivo del sistema, L
Densidad ρ	Densidad ρ

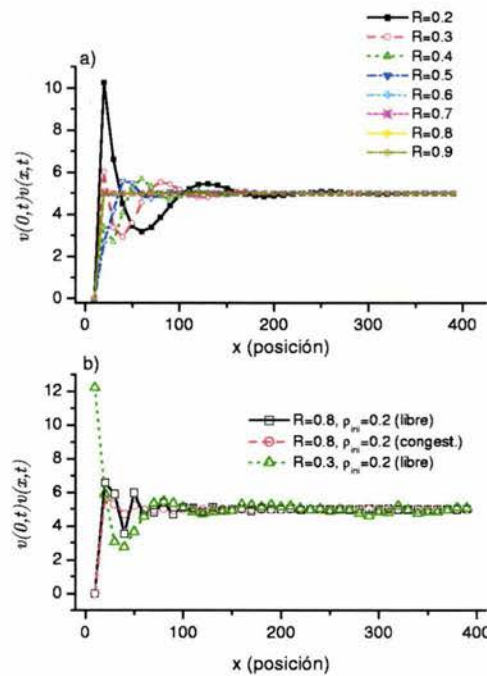


Figura 2. Gráfica de las funciones de correlación de la velocidad-velocidad $\langle v_x, v'_x \rangle$ para: (a) $\rho_{ini} = 0.7$ (b) $\rho_{ini} = 0.2$ para $L = 400$, correspondiendo a diferentes valores del parámetro de frenado R , cuyos valores son indicados por las leyendas en las gráficas. En (a), notar que las curvas colapsan para todos los valores de $R \geq 0.6$. Notar que los cúmulos para valores de R más bajos presentan un incremento difuso hasta que la estructura semejante a un líquido (fluido) se alcanza para $R = 0.2$. Observe en (b) la diferencia de los estados congestionados (línea con círculos) con respecto a los estados congestionados (línea con estrellas) en (a). confirmando el desempeño de histéresis. Los estados libres alcanzados para $R = 0.3$ son virtualmente idénticos a los alcanzados en (a) indicando una estructura semejante a un líquido (fluido).

Además, en el caso del medio granular es convencional relacionar a la intensidad de vibración y a la densidad, respectivamente, con las dinámicas rápidas y lentas de este sistema complejo. En este contexto, trabajos recientes han confirmado la necesidad de usar ambas temperaturas en el análisis de la dinámica del medio granular (Mehta, et al., 1992; Mehta y Barker). Los resultados de simulación permiten proponer los siguiente:

- el uso del inverso del parámetro de frenado $1/R$ como una temperatura efectiva que, controla las varianzas rápidas o de cada partícula del sistema.
- el uso del inverso $1/\rho$ como una temperatura efectiva, que controla las varianzas colectivas o lentas del sistema.

Desde luego, que la analogía que se ha presentado hasta momento es relativamente cualitativa. Con la finalidad de cuantificar un poco más esta analogía, se calcularon funciones de correlación de la velocidad de las partículas en el espacio, a tiempos iguales. Sea x que denota una posición en el sistema (x de 0 a $L - 1$) y $v(x, t)$ que denota la velocidad de una partícula en la posición x al tiempo t (si existe una partícula). Sea T_p el tiempo en que una ejecución alcanza el estado permanente. Entonces, se define la siguiente función de correlación:

$$c(v(0, t), v(x, t)) = \frac{1}{(T_p + 100)} \sum_{t=T_p}^{T_p+100} v(0, t) v(x, t) \quad (4.2)$$

En esta función, el término $v(0, t)$ se refiere a la velocidad en la posición 0 al tiempo t . Para cada ejecución dada, esta correlación se calcula en el estado permanente del sistema. En particular, el cálculo de esta función de correlación se realizó sobre un sistema de tamaño $L = 400$ y se promedió sobre la correlación resultante de cada uno de los estados estables de 200 ejecuciones, con la misma densidad inicial y mismo valor del parámetro R .

En la Figura 2 se muestra las gráficas de la función de correlación descrita en 4.2, resultante de simulaciones de un sistema de tamaño $L = 400$ y diferentes valores del parámetro de frenado R , para valores de $\rho_{ini} = 0.7$ (ver Figura 2a) y $\rho_{ini}=0.2$. La interpretación de las correlaciones es de la siguiente manera. Nótese de la figura 2a, que para valores del parámetro de frenado $R > 0.5$, los resultados (recta) indican que existe un espacio libre muy pequeño para que las partículas se muevan, por lo que entonces, el estado congestionado inicial se conserva (nunca hay flujo libre). En $R = 0.5$, la correlación resultante da la apariencia de una estructura oscilante, que llega a ser cada vez más evidente conforme R toma valores más pequeños. En particular, para valores de $R \in [0.4, 0.5]$, se aprecia que el mínimo y el máximo de las oscilaciones correspondientes son los más agudos, es decir, los que presentan mayor regularidad en el espaciado de las oscilaciones. Para valores más pequeños de R , la estructura empieza a ser más difusa (más espaciada) hasta que con valores de $R = 0.2$, se tiene lo que se conoce como una estructura fluida. Esta última estructura indica que las partículas se mueven libremente.

Quizás el desempeño descrito podría ser un indicador que, para $R \sim 0.4$ los estados congestionados son ordenados y este orden desaparece a medida que se alcanzan valores más pequeños del parámetro de frenado R ; situación que recuerda los pelotones- v_{pl} que se obtuvieron para el caso del modelo con condiciones de frontera periódica. Esto es análogo a la siguiente situación que normalmente se observa en el flujo en medios granulares: Si se parte de configuraciones totalmente congestionadas (típicamente caracterizadas por densidad alta), donde los granos tienen espacio suficiente para moverse libremente, se sabe que el sistema se moverá preferentemente a configuraciones que tienen alguna remembranza del orden. Conforme la excitación de la intensidad Γ se incrementa, este orden generará la forma de una estructura fluída, que se caracteriza por funciones espacio temporal más difusas; como en los resultados de simulación que se obtuvieron.

Por otra parte, como se puede observar de la Figura 2b, que corresponde a una densidad inicial $\rho_{ini} = 0.2$ y un parámetro de frenado $R = 0.8$, la diferencia de las estructuras es distintiva. Como ya se mencionó, el sistema con ρ_{ini} baja tiene una probabilidad pequeña, pero finita, de permanecer en la fase de flujo libre; aún para valores grandes del parámetro de frenado R . Así, por ejemplo, para $R = 0.8$ una fracción muy pequeña de las ejecuciones que se llevan a cabo (con densidad inicial baja) resultarán en un estado estable, con flujo libre (ver figura 2.14 en (Lárraga, 2001)); mientras que el estado promedio de las ejecuciones resultará en un estado con flujo congestionado. Por lo tanto, es difícil concluir algo concreto acerca de los estados de flujo libre para $R = 0.8$, cuya densidad inicial es baja; sin embargo, el análisis de las correlaciones muestra más claramente que los estados congestionados presentan una cierta estructura con pequeñas oscilaciones, un poco diferente de aquella resultante de una densidad inicial promedio alta (como la que se muestra en la Figura 2a). Esta estructura distinta que se observa para los estados congestionados, como función del estado inicial del sistema, es otra indicio de los efectos de histéresis que presenta el sistema. De los resultados de la función de correlación, se piensa que, una razón particular para la aparición de una estructura con pequeñas oscilaciones (contrastante con la estructura resultante de una configuración inicial totalmente estancada como la que se observa en la figura 2a), podría indicar la formación de una pequeña región de flujo libre (al inicio del sistema) que se observa en los estados congestionados que se alcanzan a partir de configuraciones iniciales con densidad promedio baja (región que no se manifiesta con ρ_{ini} altas). Además, note que cuando $R = 0.3$, la estructura del sistema es totalmente fluída y no distinguible del estado fluído en la Figura 2a (cuando la configuración inicial del sistema corresponde a una densidad promedio alta). Esta estructura fluída observada para $R = 0.3$, se asemeja al estado fluído que se produce en un medio granular cuando se tienen densidades de vibración altas (Stadler, et al., 2001).

Por otra parte, mediante una analogía con trabajos referentes al flujo granular (Mehta y Barker, 1991), se definió un cúmulo dinámico para un valor de R dado, como el número de sitios que están dentro de la primera estructura oscilante en la función de correlación de la velocidad. *La importancia física de un cúmulo dinámico es que éste refleja el rango sobre el cual las partículas se correlacionan*

mediante sus velocidades. En general, mientras menos partículas se enfrenten a obstáculos aleatorios (menor valor de R), más y más de ellas desarrollarán velocidades correlacionadas, es decir, se empezarán a mover juntas, en grupos. Ésto refleja la situación que se encontró en trabajos pioneros (Mehta y Barker, 1991), donde un decremento en las perturbaciones externas que se aplican a un sistema granular (o un incremento el parámetro de frenado R), causa un incremento en el tamaño de un cúmulo dinámico, típico de los granos. Esta similitud del comportamiento modelo de AC para un sistema abierto sin restricciones la frontera con el de los materiales granulares, es un indicador adicional de que, desde un punto de vista termodinámico, se requieren dos temperaturas para caracterizar el comportamiento de este tipo de sistemas mediante en modelo de AC: una que se relaciona a R y la otra a la densidad promedio final.

Comentarios

Los principales resultados que se presentaron en este capítulo para el caso del sistema abierto sin restricciones de frontera, conciernen a la naturaleza de una transición de primer orden (o vítrea) en un sistema de tamaño finito. Mediante el análisis de funciones de correlación de velocidad y el estudio minucioso de resultados previos, se mostró que se requiere analizar dos temperaturas efectivas (el parámetro de frenado y la densidad promedio) para caracterizar los posibles estados estables del sistema que se pueden obtener mediante el modelo de AC. En el caso del flujo granular, se sugirió la temperatura de las dinámicas rápidas (cada partícula) está relacionada a la perturbación externa, mientras que la temperatura de las dinámicas lentas (colectivas) está relacionada al inverso de la densidad. La analogía con el medio granular permitió entender mejor el comportamiento individual y colectivo de las partículas (que el tránsito son vehículos) en el sistema abierto. Los resultados que se presentaron en este capítulo fueron publicados en el artículo: *Two effective temperatures in traffic flow models: analogies with Granular Flow* en (Lárraga, et al, 2002) y son un ejemplo del conocimiento que se puede obtener de la transición de flujo libre a flujo congestionado utilizando el modelo de tránsito vehicular de AC, mediante una analogía con otros sistemas complejos.

Apéndice 2: Ajustando el modelo

En la subsección 2.4.1 se presentaron resultados de simulación para un sólo carril, del modelo que se presentó en este trabajo. En la Figura 2.3, se mostró que es posible reproducir cualitativamente bien la relación del flujo-densidad (diagrama fundamental) obtenida de mediciones de tránsito manual usando nuestro modelo. Los valores del flujo para la parte de flujo congestionado concuerdan cuantitativamente. Sin embargo, antes de que el flujo máximo se alcance, se observa una segunda pendiente positiva en el diagrama, que para una estimación cautelosa de la velocidad del vehículo precedente ($\alpha = 0.75$) no es posible reproducirla cuantitativamente con nuestro modelo tal y como se propuso en el capítulo dos.

Así, en este apéndice se presenta una pequeña modificación realizada a nuestro modelo con anticipación, con la finalidad de reproducir cuantitativamente los datos reales. Nosotros modificamos el proceso de desaceleración, de tal forma que un vehículo sólo puede alcanzar su velocidad máxima, si la distancia de seguridad al vehículo que le precede es mayor a nueve celdas (67.5 m); es decir, si la densidad existente es menor de 0.1. La regla de desaceleración $R3$ se define entonces de la siguiente manera:

R3': Si $v_i = 5$ (i.e. $v_i = v_{max}$) y $d_i^s \leq 9$ celdas entonces

$$v_i \rightarrow \text{mín}(v_i - 1, d_i^s)$$

si no (igual que la regla $R3$ de nuestro modelo original)

$$v_i \rightarrow \text{mín}(v_i, d_i^s).$$

En la Figura 1, se muestran los resultados de simulación obtenidos del modelo de anticipación modificado, para $R = 0.2$ y $\alpha = 0.75$. Los resultados se comparan con la curva experimental de los datos reales (?). La curva resultante del modelo modificado coincide con la curva experimental tanto en sus dos pendientes observadas en su parte incremental (flujo libre), como su parte de decremento (flujo congestionado). Esta concordancia del modelo modificado con la curva experimental es así, ya no sólo en forma cualitativa, si no también en una forma cuantitativa. Además, la modificación realizada al modelo es muy simple, lo que permite conservar la sencillez del modelo.

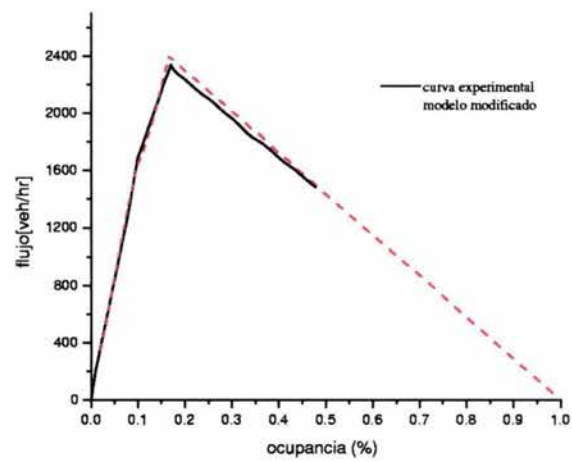


Figura 1. Diagrama fundamental del modelo modificado. El diagrama fundamental está en excelente concordancia cuantitativa con los datos de la curva experimental.

Bibliografía

- Adams, W. F., Road Traffic Considered as a Random Series. *J. Inst. Civil Engineers*, 4:121-130 (1936).
- Agyemang-Duah, K., Hall, F. L., Highway Capacity and Level of service, Balkema Rotterdam (1991).
- Alvarez, L., Horowitz, R., Li, P., Traffic flow control in automated highway systems, *Control Engineering Practice*, 7:1071-1078 (1999)
- Alvarez, L., Horowitz, R. Safe Platooning in AHS. Part I: Safety Regions Design. *Vehicle System Dynamics*, 32:23-56 (1999).
- Antoniotti et al., M. SmartAHS User's Manual. California PATH, Berkeley, California. available at website, <http://www.path.berkeley.edu/smart-ahs/sahs-manual/manual.html>.
- Barlovic, R., Santen, L., Schadschneider, A., Schreckenberg, M., Metastable States in Cellular Automata for Traffic Flow, *European Physical Journal B*, 5:793-800 (1998).
- Bejan, A. Entropy Generation Minimization (New York: CRC Press, 1996).
- Bender, J. G., An Overview of Systems Studies of Automated Highway Systems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE Vehicular Technology Society, 40:82-99 (1991).
- Blinkin, Ya, M., Problem of optimal control of traffic flow on highways. *Automation and Remote Control*, 37:662-667 (1976).
- Brackstone, M., McDonald, M. The Microscopic Modelling of Traffic Flow: Weakness and Potential Developments, In: *Traffic and Granular Flow*, Wolf, D.E, Schreckenberg, M, and Bachem, A (eds). World Scientific Press, 151 (1996).
- Burks. A., Essays on cellular automata, University of Illinois Press, (Urbana, Illinois, 1970).
- Choi, W., Swaroop, D. Assessing the Benefits of Coordination in Automatically Controlled Vehicles. In *Proceeding of the 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems*, 72-77 (2001).

- Chopard. B., Droz. M. Cellular Automata Modelling of Physical Systems (Cambridge University Press, 1998).
- Chowdhury, D., Wolf, D., Schreckenberg, M., Particle Hopping Models for Two-lane Traffic with two kinds of vehicles: Effects of Lane-changing Rules. *Physica A*, 235:417-439 (1997).
- Chowdury, D., Santen. L., Schadschneider, A. *Physics Report* 329:199-358 (2000).
- Chowdury, D., Santen. L., Schadschneider, A., Simulation of vehicular traffic: a statistical physics perspective. *Computers Science & Engineering, Computer Simulation*, 2:80-87 (2000).
- Cooperative Research Project "Verkehrsverbund NRW," c/o Center for Parallel Computing, University of Cologne, Germany (1995). See <http://www.zpr.uni-koeln.de/GroupBachem/VERKEHR.PG/>
- Cremer, M., Ludwig, J., A fast simulation model for traffic flow on basis of boolean operations, *Mathematics and Computers in Simulation* , 28:297-303 (1986).
- Cremer, M., Papageorgiou, M., Parameter identification for a traffic flow model, *Automatica*, 17:837-843 (1981).
- Datos viales del sector transporte, Aforo Vehicular. Instituto Mexicano del Transporte, <http://www.imt.mx/Espanol/DatosViales/> (2000).
- del Río, J.A., Vázquez, F., Sánchez, P., On the states of thermodynamic equilibrium, *Revista Mexicana de la Física*, 34:670- (1988).
- Duncan, C.I.D.. in *Proceedings of the 28th International Symposium on Automotive Technology and Automation (ISATA)*, edited by Soliman, J.I., and Roller, D., (Automotive Automation Ltd., Croydon, England 1995), 475; McArthur, D.. and Brown, M.D., Edingburgh Parallel Computing Centre, University of Edingburgh, Report No. EPCC-PARAMICS-CT.10, (1992).
- Edie, L.C., and R.S. Foote. Traffic Flow in Tunnels. *Proceeding of Highway Research Board*, 37:334-344 (1958).
- Eno Foundation for Transportation, *Transportation in America*, published by Transportation Policy Associates, National transportation Statistics, Report DOT-VNTFC-RSPA-92-1 (1992).
- Eissfeldt, N., Wagner, P., Effects of Anticipatory Driving in a Traffic Flow Model, *European Journal of Physics B*, 33:121-129 (2003).
- Eskafi, F., Khorramabadi, D., Varaiya, P. An automated highway system simulator. *Transportation Research Part C*, 3A:1-17. (1995).

- Fenton, R. E., Mayhan, R.J., Automated Highway Studies at The Ohio State University - An Overview, IEEE Transaction on Vehicular Technology, IEEE Vehicular Technology Society, 40:100-113 (1991).
- Chang, G., Kao, Y. An Empirical Investigation of Macroscopic Lane-changing Characteristics on Uncongested Multilane Freeways, Transportation Research, Part A. 25:375-389 (1991).
- Gartner, N., Mahmassani, H., Messer, C., Lieu, H., Cunard R., Rathy, A., Traffic Flow Theory: A State-of-the-Art-Report, monograph, published by Transportattion Research Board Committee on Traffic Flow Theory and Characteristic (1987).
- Gazis, D.C., Traffic Science, Wiley New York Press, (New York, 1973).
- Gerlough, D. L., Huber, M. J. , Traffic Flow Theory, Special Report No. 165, Transportation Research Board, National Research Council (Washington, DC 1975).
- Gerlough, D.L., in Proceedings of the 35th Annual Meeting edited by Burggrat, F. and Ward, E.M., Highway Research Board, 543 (Washington, D.C., 1956).
- Gipps, P. S. A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research B*, 20B(5):403-414 (1986).
- . Greenberg, H., Daou, A. An Analysis of Traffoc Flow, Operations Research, 7:78-85(1959).
- Greenlee, T.L., Payne, H.J., Freeway ramp metering strategies for responding to incidents., In Proceedings of the 1977 IEEE Conference on Decision and Control, 987-992 (1977).
- Greenshield, B. D., A Study in Highway Capacity, Highway Research Board, Proceedings, 14:458 (1935).
- Greenshield, B. D., Schapiro, D., Erickson, E. L., Traffic Performance at Urban Intersections. Bureau of Highway Traffic , Technical Report No. 1, Yale university Press, New Haven, CT., (1947).
- Godbole, D., Lygeros, J. Longitudinal Control of the Leader Car of a Platoon, IEEE Transactions of Vehicular Technology, 43:1125-35 (1994).
- Hall, F.L., Allen, B.J., Gunter, M.A., Transportation Research, Part A 20:197 (1986).
- Hall, F.L., Lam, T. N. The Characteristics of Congested Flow on a Freeway Across Lanes, Space, and Time, Transportation Research Part A: General, 22:45-56 (1988).
- Helbing, D., Huberman, B. A. Coherent Moving States in Highway Traffic, Nature, 396: 738-740 (1998).

- Helbing, D., Treiber, M., Gas-kinetic-based traffic model explaining observed hysteretic phase transition. *Physical Review Letters* 81:3042-3045 (1998).
- Herman, R., *Technology Human Interaction and Complexity: Reflections on Vehicular Traffic Science*. *Operations Research*, 40:199-212 (1992).
- Intelligent Transport Society of America; disponible en [http://www.itsa.org/new.nsf/vHomePage/\\$first!OpenDocument](http://www.itsa.org/new.nsf/vHomePage/$first!OpenDocument) (2003).
- Kerner, B. S. , The physics of traffic, *Physics World* 12:25-28 (1999)
- Knospe, W., Santen, L., Schadschneider, A., Schreckenberg, M. Disorder Effects in Cellular Automata for Two-lane Traffic, *Physica A*, 265:614-623 (1999).
- Knospe, W., Santen, L., Schadschneider, A., Schreckenberg, M. Towards a Realistic Microscopic Description of Highway Traffic, *Journal of Physic A* 33:477:583 (2000).
- Knospe, W., Santen, L., Schadschneider, A., Schreckenberg, M. A Realistic Two-lane Traffic Model for Highway Traffic. *Physical Review E*, 65:3369:3389 (2002).
- Krauß, S., *Microscopic Modelling of Traffic Flow: Investigation of Collisions Free Vehicle Dynamics*. Doctoral Thesis, Universität zu Köln, DLR-Forschungsbericht 98-08 (1998).
- Kühne, R., *Proceedings of the 9th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, edited by Volmuller ., and Hamerslag, R., VNU Science Press (1984).
- Lárraga, M.E. Un Autómata Celular Probabilista para la Simulación del Tránsito de Automóviles Automatizados. Tesis de maestría, IIMAS-UNAM (Marzo, 2001).
- Lárraga, M.E., del Río, J.A. y Mehta. Two Effective Temperature in Traffic Flow: Analogy with Granular Flow, *Physical A* 307:527-541 (2002).
- Lárraga, M.E., del Río, J.A. y A. Schadschneider, New Kind of Phase Separation in a CA Traffic Model with Anticipation, *Journal of Physics A: Mathematical and General*, (en prensa 2004).
- Laboratory, L.A.N. TRANSIMS: The Transportation Analysis and Simulation System Project no. tsa-do/sa. Available:<http://www-transims.tsasa.lanl.govl>. (2001).
- Li, P., Shrivastava, A. Traffic Flow Stability Induced by Constant Time Headway Policy for Adaptive Cruise Control Vehicle. *Tansportation Research Part C: Emergent Technologies*, 10:275-301 (2002).
- Li, X., Wu, Q., Jiang, R. ,*Phys. Rev. E* 64:066128_1-4 (2001).

- Lighthill, M. J., Whitham, G. B., On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of Royal Society of London Series A* 229:317-345 (1955).
- Looze, D.P., Hout, K., Sandell, N.R., Athans, M., On decentralized Estimation and Control with Application to Freeway Ramp Metering, *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-23:268-275 (1978).
- May, A. D., *Traffic Flow Fundamentals*, Prentice -Hall Press (Englewood Cliffs, NJ, 1990).
- Mehta, A., Barker, G.C. Vibrated Powders a Microscopic Approach, *Physical Review Letters*, 67:394 (1991).
- Mehta, A., Barker, G.C. Glassy Dynamics Granular Compaction, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 12:6619:6628 (2000).
- Mehta, A., Need, R.J., Dattagupta, S. The Langevin Dynamics of Vibrated Powders, *Journal of Statistical Physics*, 68:1131 (1992).
- Nagatani, T. Kinetics of Segregation in a Two-lane Highway Traffic Flow, *Journal of Physics A: Mathematical and general*, 29:6531-6542 (1996).
- Nagel, K., Particle hopping models and Traffic flow theory, *Physical Review E*, 53:4655-4672, (1996).
- Nagel, K., Schreckenberg, M., Cellular automaton models for freeway traffic, *J. Phys. I* , 2:2221-2229, (1992).
- Nagel, K., Wolf, D., Wagner, P., Simon, P. Two-Lane Traffic rules for cellular automata: A systematic approach, *Physical Review E*, 58:1425:1437 (1998).
- Newell, G. F., *Mathematical Models for Freely Flowing Highway Traffic*, *Operation Research*, 3:176-186. (1955).
- Papageorgiou, M., Mayr, R., Optimal decomposition methods applied to motorway traffic control, *International Journal of Control*, 35:269-280 (1982).
- Payne, H.J., *Models of freeway traffic and control*. *Simulations Council Proceedings*, 1:51-61 (1971).
- Perrier, J. -Y., Sipper, M., Zahnd, J., Toward a viable, self-reproducing universal computer, *Physica D*, 97:335-352 (1996).
- Pipes, L. A., *An Operational Analysis of Traffic Dynamics*, *J. Appl. Phys.*, 24:274-281 (1953).
- Prigogine, I., Herman, R., *Kinetic Theory of Vehicular Traffic* , Elsevier, New York (1971).
- Prontuario carretero de la autopista México-Cuernavaca, CAPUFE (2000).

- Reiss, H., Hammerich, A.D., Montroll, E.W. Thermodynamic Treatment of Nonphysical Systems: Formalism and an Example (single-lane traffic). *Journal of Statistical Physics*, 42(3/4):647-687 (1986).
- Reuschel, A., Fahrzeugbewegungen in der Kolonne, *Oesterreichisches Ingenieur-Archiv* 4, 3/4:193-215. (1950).
- Rickert, M., Nagel, K., Schreckenberg, M., Latour, A. Two Lane traffic Simulations using Cellular Automata. *Physica A*, 231:534-550 (1996).
- Rillings, J. H., Automated Highways, *Scientific American* 365:60-63 (1997)
- Salas, H., Cuevas, S., López de haro, M. Entropy Generation Analysis of Magnetohydrodynamic Induction Devices, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 32:2605-2608 (1999).
- Schmittman, B. y Zia, R.K.P Phase Transition and Critical Phenomena, 17, Editores: Donb, C. y Lebowitz J.L (Academic Press, 1995).
- Schadschneider, A, Schreckenberg, M. Cellular Automaton Models and Traffic Flow, *Physica A*, 26:679:683 (1993).
- Secretaría del Medio Ambiente del D.F., Departamento de Educación Ambiental, ¿Quieres saber más sobre el ambiente en la Ciudad de México? El Aire, http://www.sma.gob.mx/educacion/04_saber/aire.htm
- Shladover, S. E., Desoer, C. A. , Hedrick, J. D. , Tomizuka, M., Walrand, J., Zhang, W.B., McMahon, D.H., Peng, H., Shiehholeslam, S., McKeown, N., Automated vehicle control developments in the PATH program, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 40:114-130 (1991)
- SIAS-Transport-Planners. Paramics Micosimulation. Available: <http://www.sias.com>. (2002).
- Smith, A., Cellular automata theory. Technical Report 2, Stanford Electronic Lab., Stanford University, (1969).
- Smith, L., Beckman, R., Anson, D., Nagel, K., and Williams, M. TRANSIMS: Transportation analysis and simulation system. Proceedings of the 5th National Transportation Planning Methods Applications Conference, (Seattle, 1995)
- Stadler, P.F., Mehta, A., Luck, J.M. Glassy States in a Shaken Sand Box, *Advances in Complex Systems*, 4:429:439 (2001).
- Swaroop, D., String Stability of Interconnected Systems: An Application to platooning in automated highway systems, Ph. D. dissertation, Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley (1994).