



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LA COMPUTACIÓN

**ANÁLISIS DEL IMPACTO DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS Y
CONVENCIONALES SOBRE EL TRÁFICO VEHICULAR
MIXTO**

T E S I S

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LA COMPUTACIÓN**

PRESENTA:

LAURA EVELYN GÓMEZ SUÁREZ

DIRECTORA DE TESIS:

**DRA. MARÍA ELENA LÁRRAGA RAMÍREZ
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, JULIO 2023.



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.

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis sinodales, Dra. María Elena Lárraga Ramírez, Dr. Luis Agustín Álvarez-Icaza Longoria, Dr. Carlos Gershenson García, Dr. Jesús Antonio del Río Portilla y Dr. Héctor Alonso Guzmán Gutiérrez, por los comentarios a este trabajo, los cuales fueron fundamentales para su desarrollo y conclusión satisfactoria.

También agradezco al Posgrado en Ciencia e Ingeniería de la Computación, por todo el apoyo recibido durante mis estudios de maestría, que derivado de la pandemia los realicé casi en su totalidad en línea. Particularmente, al coordinador del posgrado el Dr. Javier Gómez, la Sra. Lourdes González y la Ing. Cecilia Mandujano, por su paciencia y atenciones oportunas.

Al Instituto de Ingeniería, por la beca otorgada durante mis estudios de maestría y los beneficios otorgados.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, ha sido un honor formar parte de esta importante institución.

Al Consejo Nacional de Ciencia, Humanidades y tecnología CONACYT, mi agradecimiento por la oportunidad que se me brindó al recibir una beca para llevar a cabo mis estudios de maestría.

A mi padre Héctor Gómez Ocampo que desde el cielo me apoya y me anima a superarme para cumplir con todas mis metas; gracias por todo el apoyo y amor que me brindaste en vida.

Estoy inmensamente agradecida con mi madre Leticia Laura Suárez Villegas, porque me impulsa a superarme cada día para alcanzar mis metas, gracias por el apoyo, amor y consejos, hoy coronó un éxito más a tu lado.

A mis hermanos Héctor Gómez Suárez y Lynda Leticia Gómez Suárez por todos los buenos momentos que hemos compartido, gracias por permitirme ser un buen ejemplo a seguir y por siempre apoyarme en mis decisiones.

A mi familia Suárez Villegas por que han estado ahí presentes siempre y mucho más cuando les he necesitado.

A mis amigos Carlos Martínez, Dulce de la torre, Carolina García, Carlos Maldonado y compañeros del posgrado Israel Velázquez y Manuel Ortiz, por los buenos momentos que hemos compartido.

RESUMEN

El aumento en la población, la gran cantidad de vehículos que circulan diariamente, la deficiencia de infraestructura y nuevas carreteras ocasiona ciudades congestionadas con el riesgo de sufrir constantes atascos y congestión en horas pico. Ante esta problemática, en los últimos años los vehículos autónomos (AV) están preparados para constituir una parte importante del tráfico vehicular, debido a la forma segura de su conducción, impacto en la seguridad, su eficiencia en tiempo de reacción ultracorto, bajo requerimiento de espacio y avance.

Se espera que los vehículos convencionales y autónomos interactúen en las carreteras durante un largo periodo de tiempo, ejerciendo una enorme influencia en el sistema de tráfico vial tradicional. Por lo que, su estudio sigue siendo una línea de investigación prioritaria. En esta dirección, el modelo basado en autómatas celulares (AC), se ha establecido como un paradigma de modelación bien establecido por su capacidad para reproducir varios fenómenos complejos observados en el tráfico vehicular y reflejar las características del mismo de manera realista y simple.

En este trabajo de tesis, se introduce un modelo bajo el enfoque microscópico de los Autómatas Celulares (AC) para estudiar, analizar y simular la dinámica del tráfico vehicular mixto compuesto de vehículos autónomos y convencionales en vías de varios carriles y evaluar el impacto que genera en las mismas cuando se consideran diferentes niveles de penetración de los vehículos autónomos. Para ello, el modelo propuesto, se basa en un modelo previo que, se introdujo recientemente para la dinámica del flujo vehicular de vehículos convencionales heterogéneos con diferentes características mecánicas y capacidades para acelerar y desacelerar; el cual describe el movimiento de los vehículos bajo la consideración de un Movimiento Uniforme Acelerado y distancias de velocidad relativas, con el fin de tener una representación más realista de la dinámica vehicular y reducir el movimiento brusco de la mayoría de los modelos de autómatas celulares previos. Así, el modelo que se propone en este trabajo de tesis modifica la definición de las distancias de seguridad que requiere un vehículo autónomo para tomar una acción, acelerar, desacelerar, mantener o aplicar frenado de emergencia, y el tiempo de reacción del mismo. Además, se introduce la consideración de un factor de seguridad que permite estudiar los efectos de considerar diferentes distancias de seguridad reducidas para los vehículos autónomos y los efectos que genera en el tráfico vehicular.

Resultados de simulación para una vía con un solo carril indican que el flujo vehicular máximo y la densidad crítica (donde los vehículos se mueven cercanos a su velocidad máxima), se incrementa con el aumento del nivel de penetración de los vehículos autónomos. Tres fases del flujo vehicular, libre, sincronizado y estancado se observan, al igual que la de los vehículos convencionales; sin embargo, la fase sincronizada donde los vehículos se mueven más lentamente que en flujo libre pero nunca están estancados, se incrementa hasta casi un setenta por

ciento de ocupancia de la vía, reduciendo ampliamente los estancamientos. Aún más, un análisis con diferentes valores de factor de seguridad de los vehículos autónomos indica que a medida que las distancias se reducen mayor es el flujo vehicular que se logra.

El modelo propuesto se extiende para el tráfico vehicular mixto de dos carriles, con base en las distancias de seguridad, sin necesidad de hacer el modelo más complejo, manteniendo la simplicidad de los modelos basados en autómatas celulares, no obstante, este modelo es capaz de incluir de manera precisa y con un alto nivel de detalle microscópico varias características del comportamiento individual tanto de conductores como de vehículos, lo que lo hace adecuado para estudiar diversos escenarios del tráfico vehicular real mixto.

ABSTRACT

The increase in population, the large number of vehicles circulating daily, the deficiency of infrastructure and new roads cause congested cities with the risk of constant traffic jams and congestion during peak hours. In the face of this problem, in recent years autonomous vehicles (AV) are prepared to become an important part of traffic, due to their safe driving, impact on safety, efficiency in ultra-short reaction time, low space requirement, and advancement. It is expected that conventional and autonomous vehicles will interact on the roads for a long period of time, exerting a significant influence on the traditional traffic system. Therefore, their study remains a priority line of research. In this direction, the model based on cellular automata (CA) has established itself as a well-established modeling paradigm for its ability to reproduce various complex phenomena observed in vehicular traffic and reflect its characteristics in a realistic and simple way.

In this thesis work, a model is introduced under the microscopic approach of Cellular Automata (CA) to study, analyze, and simulate the dynamics of mixed vehicular traffic composed of autonomous and conventional vehicles on multi-lane roads, and evaluate the impact it generates when different levels of autonomous vehicle penetration are considered. To do this, the proposed model is based on a previous model that was recently introduced for the dynamics of vehicular flow of heterogeneous conventional vehicles with different mechanical characteristics and abilities to accelerate and decelerate. This model describes the movement of vehicles under the consideration of Uniform Accelerated Motion and relative speed distances in order to have a more realistic representation of vehicular dynamics and reduce the abrupt motion of most previous cellular automata models. Thus, the model proposed in this thesis work modifies the definition of safety distances that an autonomous vehicle requires to take action, accelerate, decelerate, maintain, or apply emergency braking, as well as its reaction time. Additionally, the consideration of a safety factor is introduced to study the effects of considering different reduced safety distances for autonomous vehicles and the effects it generates on vehicular traffic.

Simulation results for a single lane road indicate that the maximum vehicular flow and critical density (where vehicles move close to their maximum speed) increase with the increase in the level of penetration of autonomous vehicles. Three phases of vehicular flow, free flow, synchronized flow, and congested flow are observed, similar to conventional vehicles. However, the synchronized flow phase, where vehicles move slower than in free flow but are never fully congested, increases to almost seventy percent of road occupancy, significantly reducing congestion. Furthermore, an analysis with different values of the safety factor for autonomous vehicles indicates that as distances decrease, the achieved vehicular flow increases.

The proposed model is extended for mixed two-lane traffic, based on safety distances, without the need to make the model more complex, maintaining the simplicity of models based on cellular automata. However, this model is capable of

including accurately and with a high level of microscopic detail various characteristics of individual behavior of both drivers and vehicles, making it suitable for studying various scenarios of real mixed traffic.

Tabla de contenido

Capítulo 1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Justificación.....	1
1.2.	Antecedentes de la investigación.....	2
1.3.	Objetivo general	3
1.4.	Hipótesis.....	3
1.5.	Contribución	3
1.6.	Organización de la tesis.....	4
Capítulo 2	CONCEPTOS RELACIONADOS A SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTE Y VEHÍCULOS AUTÓNOMOS	5
2.1.	Vehículos Autónomos.....	5
2.2.	Un poco de historia.....	5
2.3.	Componentes de los vehículos autónomos	6
2.4.	Niveles de automatización	7
Capítulo 3	AUTÓMATAS CELULARES Y CONCEPTOS RELACIONADOS	9
3.1.	Autómatas celulares	9
3.2.	Componentes de autómata celular	9
3.3.	Definición formal.....	10
3.3.1.	Limitaciones de la frontera	11
3.4.	Usos y aplicaciones	12
Capítulo 4	ANÁLISIS DE TRÁFICO.....	14
4.1.	Tráfico	14
4.1.1.	Congestión vehicular	14
4.1.2.	Elementos del tráfico vehicular	15
4.2.	Diagrama y etapas del tráfico vehicular.....	15
4.3.	Enfoques de modelación	17
Capítulo 5	MODELOS DE TRÁFICO VEHICULAR BASADOS EN AUTÓMATAS CELULARES.....	19
5.1.	Modelo NaSch.....	19
5.1.1.	Conceptualización del modelo Nagel-Schreckenberg	19
5.2.	Modelo LAI	22
5.3.	Modelo LAI mejorado (LAI-E)	23
5.3.1	Actualización del modelo LAI-E	26
5.3.2	Limitaciones	28
5.4	Estado del arte: vehículos autónomos y su modelación.....	29

Capítulo 6 MODELO DE AC QUE CONSIDERA VEHÍCULOS AUTÓNOMOS Y CONVENCIONALES (LAI-EM)	32
6.1. Consideraciones generales del modelo LAI-EM	32
6.2. Definición de dinámica de frenado.....	34
6.3. Distancia de vehículo líder detenido [47]	37
6.4. Distancia de vehículos en movimiento [47]	38
6.5. Reglas de actualización del modelo LAI-EM	40
Capítulo 7 EXTENSIÓN MULTICARRIL DEL MODELO LAI-EM.....	43
7.1. Descripción de extensión del modelo multicarril (LAI-EM)	43
7.1.1 Reglas de cambio de carril [47].....	44
Capítulo 8 RESULTADOS	46
8.1. Consideraciones de la frontera.....	46
8.2. Resultados en un carril.....	46
8.2.1. Resultados con factor de seguridad $r=0$ con vehículos homogéneos.....	48
8.2.2. Vehículos autónomos, con variación en factor de seguridad.	51
8.2.3. Simulación con tráfico vehicular mixto	55
8.3. Resultados de multicarril	57
Capítulo 9 CONCLUSIONES	63
9.1. Trabajos futuros.....	64
Bibliografía.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Algunos componentes de los vehículos autónomos. Fuente: [5].	6
Figura 2: Diferentes niveles de automatización vehicular. Fuente: [8]	8
Figura 3: Se especifica que la primera celda del modelo está conectada con la última, lo que se conoce como una condición de frontera periódica.	11
Figura 4: Autómata celular con borde absorbente.	11
Figura 5: Las tres fases del tráfico: flujo libre (FL), flujo sincronizado (FS) y flujo congestionado (FC) en el plano flujo-densidad. Fuente [22].	17
Figura 6: Caso ilustrativo representando una sección de calle mediante el modelo NaSch, el cual se basa en AC.	20
Figura 7: Escenarios posibles cuando se considera tráfico vehicular mixto, para los vehículos líder y seguidor.	33
Figura 8: Esquema de cambio de carril y sus parámetros.	44
Figura 9: Representación de los vehículos en las fronteras.	46
Figura 10: Diagrama fundamental flujo-densidad. De color azul se muestra el diagrama considerando sólo vehículos autónomos; mientras que de color magenta resulta de considerar sólo vehículos convencionales. Se considera en ambos casos un factor de seguridad $r=0$.	48
Figura 11: Diagrama fundamental, velocidad vs densidad. El diagrama de color azul: resulta de considerar sólo vehículos autónomos; el diagrama de color magenta: resulta de considerar sólo vehículos convencionales. El factor de seguridad es $r=0$.	49
Figura 12: Diagrama espacio tiempo (a) y distribución de velocidad (b), para una densidad igual a 20 veh/km con vehículos autónomos.	50
Figura 13: Diagrama espacio-tiempo (a) y distribución de velocidad (b) de la densidad 60 veh/km con vehículos autónomos.	50
Figura 14: Diagrama espacio-tiempo (a) y distribución de velocidad (b) para una densidad de 140 veh/km con vehículos autónomos.	51
Figura 15: Diagrama espacio-tiempo (a) y distribución de velocidad (b) de la densidad 160 veh/km con vehículos autónomos.	51
Figura 16: Diagrama fundamental, flujo-densidad. De color purpura se muestra el diagrama con un factor de seguridad $r=0$, de color café el diagrama resulta de tomar un factor de seguridad $r=-1$; de color azul el diagrama resulta de considerar un factor de seguridad $r=-2$.	53
Figura 17: Diagrama fundamental, velocidad-densidad. De color purpura se muestra el diagrama con un factor de seguridad $r=0$, de color café el diagrama resulta de tener en cuenta un factor de seguridad $r=-1$; de color azul el diagrama resulta de considerar un factor de seguridad $r=-2$.	53
Figura 18: Distribución de velocidad para densidad igual a 140 veh/km (a), 160 veh/km (b), 180 veh/km (c) y $r=-1$ m/s.	54
Figura 19: Distribución de velocidad para densidad igual a 140 veh/km (a), 160 veh/km (b), 180 veh/km (c) para $r=-2$.	55
Figura 20: Diagrama fundamental flujo-densidad para 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100% de vehículos convencionales y 100% de vehículos autónomos con $r = 0$.	55
Figura 21: Diagrama fundamental velocidad-densidad para 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100% de vehículos convencionales y 100% de vehículos autónomos con $r = 0$.	56
Figura 22: Diagrama de distribución de velocidad para 50% de vehículos autónomos con densidad de 75 veh/km.	56
Figura 23: Diagrama fundamental resultante de un carril y dos carriles, considerando un 80% de vehículos autónomos.	59
Figura 24: Diagrama de la velocidad promedio con respecto a la densidad. Para el caso del sistema multicarril se muestra la velocidad promedio por carril.	59
Figura 25: Instantánea del carril izquierdo (a) y derecho (b), respectivamente; para densidad de 50 veh/km.	60
Figura 26: Instantánea del carril izquierdo (a) y derecho (b), respectivamente, para densidad de 80 veh/km.	60
Figura 27: Uso de carril para los vehículos autónomos (a) y convencionales (b).	61
Figura 28: Uso de carril de tráfico mixto del modelo LAI-EM.	62

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Variables de la dinámica de frenado.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 2 Valores de los parámetros usados para las simulaciones de un carril.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 3 Parámetros usados para las simulaciones del modelo multicarril.....</i>	<i>58</i>

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

El tráfico de vehículos es una situación que surge como consecuencia del movimiento de automóviles en las calles, carreteras y autopistas. Es afectado por diversos factores como la cultura, la economía, la política y la sociedad de las principales ciudades del mundo. El rápido aumento de la población, el incremento en la cantidad de coches por habitante y la limitación de espacio para construir nuevas vías, son algunos de los desafíos a los que se enfrentan las grandes urbes con elevada densidad poblacional para solucionar el problema de la congestión vehicular, especialmente durante las horas pico. No obstante, los expertos indican que el tiempo de las horas pico aumentará gradualmente debido a la gran cantidad de vehículos que se acumulan, tanto en las principales avenidas de la ciudad como en las carreteras [1].

Según investigaciones recientes, se estima que existen más de mil millones de vehículos circulando en las carreteras, y se espera que esta cifra se duplique para el año 2040 [2]. Ante esta situación, la construcción de nuevas vías ya no es una opción viable. En cambio, se están buscando nuevas alternativas que se centren en evaluar y mejorar la gestión de las vías de transporte existentes, así como en promover un transporte más ecológico, seguro y eficiente a nivel mundial. Una de estas alternativas son los sistemas inteligentes de transporte (ITS), los cuales consisten en un conjunto de soluciones tecnológicas basadas en las telecomunicaciones y la informática, diseñadas para mejorar la operación y seguridad del transporte terrestre. En este sentido, los vehículos autónomos o altamente automatizados han aparecido como una alternativa para garantizar la seguridad de los pasajeros, asegurar una movilidad inclusiva para todos y promover una mayor protección del medio ambiente. Por lo tanto, se ha invertido una importante cantidad de recursos en los últimos años para el desarrollo de estos vehículos, considerándolos una solución novedosa a estos problemas.

Los vehículos autónomos pueden obtener parámetros del ambiente más precisos, en comparación con la percepción humana; por lo tanto, son capaces de reaccionar casi instantáneamente a los cambios en las condiciones de conducción, a diferencia del retraso observado en el tiempo de reacción humano, también se pueden conducir muy cerca uno de otro a través de la tecnología de control de cruce adaptativo (ACC). Por lo tanto, la distancia entre dos vehículos autónomos sucesivos es considerablemente más corta que entre dos vehículos convencionales.

Gracias a las constantes actualizaciones de algoritmos y técnicas de detección, los vehículos autónomos (AV) están preparados para constituir una parte importante del tráfico. Además de su capacidad de conducción excepcional, los vehículos

autónomos brindan mayor seguridad y eficiencia al sistema de tráfico. Se espera que su implementación mejore las capacidades de las carreteras. Sin embargo, se prevé que la tasa de adopción de los vehículos autónomos sea lenta. Es probable que los vehículos convencionales y los AV (vehículos autónomos) compartan las carreteras durante un largo período de tiempo.

En la actualidad hay interrogantes que deben ser estudiadas, por ejemplo: ¿Cómo será la interacción de estos dos tipos de vehículos?, ¿Qué impacto generará en la dinámica del tráfico vehicular?, ¿Mejoraran la eficiencia y seguridad en carretera?

Debido a las interrogantes planteadas es importante realizar un estudio del análisis de tasas de penetración de vehículos autónomos para detectar las mejoras que se observan en la capacidad de las carreteras.

1.2. Antecedentes de la investigación

A la fecha, son pocos los estudios enfocados en el tráfico vehicular mixto con vehículos autónomos y convencionales, una parte importante de estos estudios son los modelos y enfoques (microscópicos, mesoscópicos y macroscópicos), que permiten evaluar la dinámica y capacidades del tráfico mixto (se detalla en capítulo 4).

La modelización computacional es un enfoque utilizado para analizar el impacto en las carreteras y obtener resultados similares a la realidad. Por esta razón, los modelos de autómatas celulares (AC) son una herramienta precisa para simular el comportamiento del tráfico vehicular. Los autómatas celulares (AC) son modelos matemáticos de un sistema dinámico que consiste en un conjunto de celdas o células que asumen diferentes estados o valores, estos modelos son herramientas útiles para simular sistemas complejos, ya que permiten simular las características microscópicas de los elementos que lo componen a través de reglas locales que ayudan a entender su comportamiento global, logran simular las decisiones tomadas por los conductores en un escenario real. La definición de AC es aceptada como un modelo para sistemas de transporte, que se introdujo por Nagel y Schreckenberg en 1992, conocido como modelo NaSch, siendo este modelo la base para el desarrollo de otros modelos, principalmente para modelación de tráfico con velocidades altas, tráfico multicarril y tráfico mixto.

Recientemente, se introdujo el modelo LAI-E. Este modelo asume que el movimiento del vehículo se describe considerando el Movimiento Uniforme Acelerado (MUA) que brinda una representación realista de la dinámica vehicular y evita el movimiento brusco que se observa en muchos de los modelos de AC. Además, es un modelo que tiene en cuenta un límite en la capacidad de aceleración y desaceleración del propio vehículo.

Sin embargo, no considera algunos aspectos de los AVs que son importantes cuando se desea simular el flujo vehicular mixto en multicarril, de vehículos convencionales y autónomos, y los impactos que puede generar. Pocos son los

estudios de flujo vehicular mixto y los que existen no representan de manera adecuada las características de los vehículos autónomos.

1.3. Objetivo general

De esta manera, el objetivo general consiste en desarrollar un modelo de AC para modelar la dinámica vehicular del tráfico vehicular mixto, considerando vehículos autónomos y convencionales. Específicamente, estos modelos son adecuados para simular, analizar y estudiar el comportamiento del tráfico mixto en vías que tienen uno o varios carriles, así como el impacto que esto produce en las vías bajo diferentes escenarios.

1.4. Hipótesis

Es posible generalizar el modelo LAI-E para su uso con vehículos convencionales y autónomos aplicándolo a diferentes escenarios; manteniendo su simplicidad computacional, pero a la vez que represente fielmente el desempeño de los vehículos.

1.5. Contribución

El modelo desarrollado en este estudio difiere de los existentes en la literatura ya que permite analizar el flujo mixto de vehículos convencionales y autónomos. Lo que lo hace diferente, es no sólo que considera distancias y velocidades relativas entre los vehículos para definir su distancia de seguridad para que se tome una acción y que se tomen aceleraciones/desaceleraciones limitadas; sino el hecho que el movimiento vehicular es más acorde al de los vehículos reales.

Sin embargo, también tiene en cuenta la incorporación, el comportamiento particular de los vehículos autónomos y sus capacidades al tomar acciones, considerando un tiempo de reacción distinto y un factor de riesgo r para los vehículos autónomos que permite calcular las distancias seguras reducidas.

Por lo tanto, el modelo propuesto en este trabajo de tesis, nombrado LAI-EM, sienta las bases para el desarrollo futuro de un simulador de vías en países que implementen tráfico mixto en carreteras de múltiples carriles. El objetivo es contribuir a la literatura mediante la creación de modelos de simulación microscópica del tráfico mixto, los cuales no sólo impacten en el ámbito de las ciencias computacionales y el transporte, sino que también sirvan como herramienta para la toma de decisiones en el despliegue futuro de vehículos autónomos.

1.6. Organización de la tesis

Se presenta la organización del trabajo de tesis de la siguiente manera.

Primeramente, en el capítulo 2, se introducen los conceptos relacionados a sistemas de transporte inteligente y vehículos autónomos.

En el capítulo 3, se introducen brevemente los autómatas celulares. Mientras que en el capítulo 4, se incorporan conceptos relacionados al tráfico vehicular y su modelación.

En el capítulo 5, se proporciona la descripción de los modelos existentes de AC para el tráfico vehicular.

En el capítulo 6, se establece un modelo AC denominado LAI-EM, diseñado para simular el tráfico vehicular que involucra vehículos autónomos y convencionales circulando en un carril.

En el capítulo 7, se amplía el modelo LAI-EM para incluir un circuito de varios carriles, en el cual participan vehículos autónomos y convencionales. Se incorporan las distancias y velocidades relativas en la definición de las reglas de cambio de carril.

En el capítulo 8, se presentan resultados para el modelo que se propone en este trabajo de tesis. Particularmente se analizan resultados en uno y dos carriles, con diferentes niveles de penetración y con variación del factor de seguridad de los vehículos autónomos. El objetivo es comprobar la hipótesis que se plantea en este trabajo de tesis.

Por último, se presentarán las conclusiones de este trabajo y la bibliografía.

Capítulo 2 CONCEPTOS RELACIONADOS A SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTE Y VEHÍCULOS AUTÓNOMOS

Resumen: En el presente capítulo, se definen los conceptos claves en relación con los vehículos autónomos, incluyendo sus componentes y niveles de automatización, y otros conceptos para su entendimiento. La finalidad es poner en contexto al lector para facilitar el entendimiento del presente trabajo.

2.1. Vehículos Autónomos

Los vehículos autónomos han ganado cada vez más importancia en la industria automotriz y se espera que sean cada vez más comunes. Pero, ¿qué son exactamente los vehículos autónomos? Un vehículo autónomo (AV) es aquel que puede moverse sin intervención humana. Para lograrlo, utiliza diversas tecnologías que permiten detectar e identificar personas y objetos, medir la velocidad, predecir las intenciones de otros conductores y tomar decisiones en tiempo real. Un AV funciona mediante el uso de sensores avanzados a través de los cuales recopila información de su entorno, algoritmos matemáticos y computacionales para procesar los datos y tener un control del mismo en muy poco tiempo [3].

2.2. Un poco de historia

Los vehículos autónomos se introdujeron en la década de los años 80's, cuando en 1987 Ernst Dickmanns, considerado el padre del vehículo autónomo tal como lo conocemos hoy, convirtió una furgoneta Mercedes-Benz en un vehículo autónomo controlado por una computadora integrada [4]. El vehículo logró una conducción autónoma del 95% en vías sin tráfico y alcanzó una velocidad de 63 kilómetros por hora. Fue hasta 1994 en París, que se logró que un vehículo recorriera mil km en condiciones de tráfico real. Un año después, un auto Mercedes-Benz viajó de manera completamente autónoma desde Munich hasta Copenhague. Desde entonces, ha habido un aumento constante en el desarrollo de vehículos autónomos y se prevé que para el año 2030 haya una cantidad significativa de estos vehículos en circulación en las carreteras.

2.3. Componentes de los vehículos autónomos

Los componentes de los vehículos autónomos varían con base en el nivel que se encuentren, pero en lo siguiente se describen algunos de ellos.

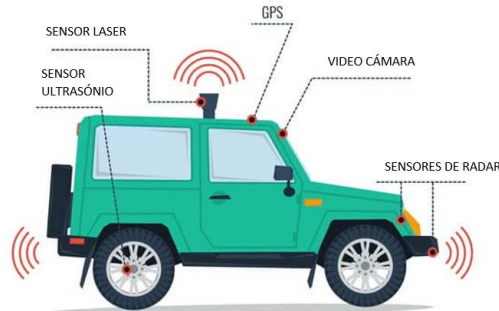


Figura 1: Algunos componentes de los vehículos autónomos. Fuente: [5].

- **Cámaras:** El vehículo percibe el entorno por medio de un sistema de cámara que se encarga de procesar imágenes y reconocer colores, texturas y formas. Sin embargo, el desafío es procesar estas imágenes para reconocer los objetos y elementos ambientales [6].
- **GPS:** El seguimiento a la posición de un vehículo en cualquier instante de tiempo y lugar es a través del uso del Sistema de Posicionamiento Global o GPS (por sus siglas en inglés). El GPS cuenta con un segmento espacial compuesto por 24 satélites que, mediante métodos matemáticos, determina las posiciones de los vehículos [7].
- **LIDAR:** Se trata de un sistema que emplea un rayo láser intermitente para detectar objetos. Mediante la medición del tiempo de retardo entre la emisión del pulso y la detección de la señal reflejada, se puede determinar la distancia de los objetos detectados [6].
- **RADAR:** El acrónimo RADAR, que significa Radio Detection and Ranging, se encarga de la detección y medición de la distancia por medio de ondas de radio. Este sistema está integrado en el vehículo y se utiliza para detectar la distancia, el ángulo y la velocidad de los objetos, sin embargo, no puede identificar el tipo de objeto. El funcionamiento se basa en la emisión de pulsos electromagnéticos de alta frecuencia que son reflejados por los objetos y recibidos en el mismo lugar. De esta manera, al emplear distintas longitudes de onda, se puede detectar no solo objetos, sino también luz visible y sonido [6].
- **Sensores de ultrasonidos:** Estos sensores emiten ondas ultrasónicas que son imperceptibles para el oído humano, rebotan en los obstáculos y calculan la distancia a los obstáculos, de forma similar al radar. Es un dispositivo inalámbrico instalado en el parachoques [6].

2.4. Niveles de automatización

La Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) ha creado los Niveles en Automóviles Autónomos, los cuales constituyen un conjunto de directrices para describir diversas etapas de autonomía en vehículos. Estos niveles se establecen de tal manera que, cuanto menor sea el número, mayor será la dependencia que tenga la conducción del conductor. Asimismo, cada número de nivel más alto indica una mayor autonomía, la cual se logra gracias a un sofisticado sistema conformado por sensores, cámaras y algoritmos.

Según la clasificación de la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA 2013), actualmente existen seis niveles de automatización, los cuales se detallan a continuación (ver Figura 2). Por otro lado, otro grupo de clasificación define la autonomía en cinco niveles y omite el nivel 0, que se refiere a la ausencia tanto de autonomía como de dispositivos de asistencia al conductor.

- **Nivel 0 Control del conductor:** Es el nivel más básico, el conductor tiene el control y realiza todas las tareas de conducción, como dirección, frenado, aceleración y cambios de marcha.
- **Nivel 1 Asistencia al conductor:** En este nivel, el conductor sigue siendo responsable de la mayoría de las funciones de conducción, pero cuenta con el apoyo de dispositivos de asistencia, como asistencia en la dirección o la aceleración.
- **Nivel 2 Automatización de la conducción parcial:** Los vehículos de nivel 2 tienen la capacidad de realizar en parte el control longitudinal y transversal, pero carecen de un sistema completamente automatizado de detección de eventos y objetos (OEDR por sus siglas en inglés). Por esta razón, se considera que los vehículos de nivel 2 son semiautónomos. En este nivel, los sistemas pueden ser más avanzados que los del nivel anterior, como la asistencia de estacionamiento y la asistencia en atascos.
- **Nivel 3 Automatización de la conducción de manera condicional:** En este nivel, tienen la capacidad de realizar múltiples funciones de conducción en tiempo real en situaciones específicas, por ejemplo, en vías claramente mapeadas. No obstante, no pueden manejar eventos inesperados ni accidentes por su cuenta y necesitan la intervención del conductor. En este nivel, se pueden encontrar sistemas como el controlador de autopista y el controlador de tráfico en atascos.
- **Nivel 4 Alta automatización de la conducción:** En este nivel, los vehículos pueden operar de manera autónoma en situaciones controladas y no requieren supervisión humana, ya que pueden manejar casos inusuales.
- **Nivel 5 Automatización completa:** Este es el nivel más alto, en el cual los vehículos conducen de manera totalmente autónoma, sin la intervención de un conductor humano.

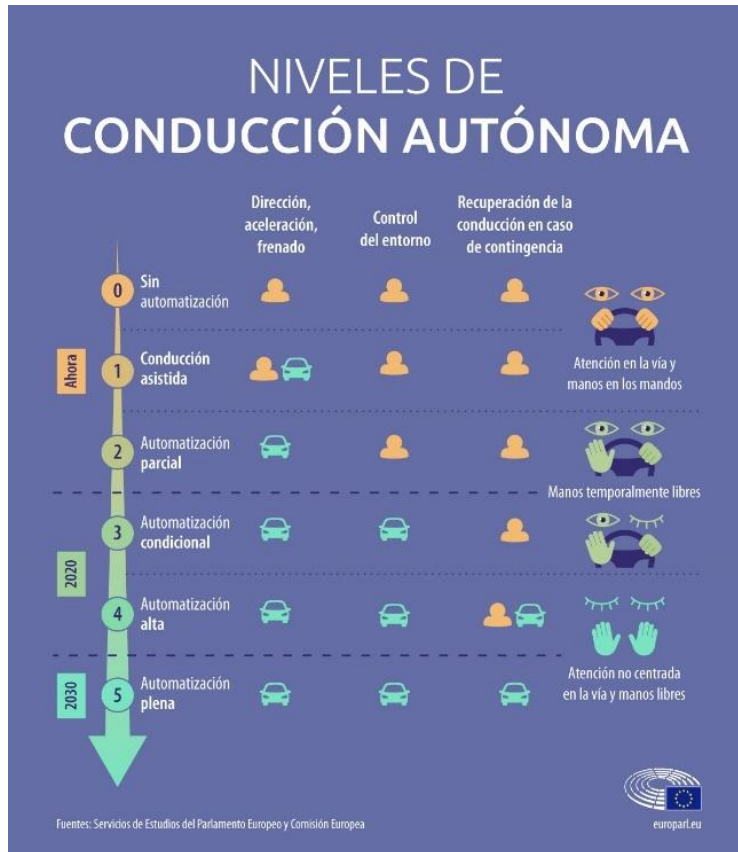


Figura 2: Diferentes niveles de automatización vehicular. Fuente: [8]

En resumen, el despliegue de vehículos autónomos depende no solo del progreso tecnológico, sino también de factores relacionados con la infraestructura, la regulación, la legislación y la política, que aún no están claros en todo el mundo. Actualmente, el nivel de automatización vehicular es el nivel 4.

El siguiente capítulo presenta conceptos relacionados con el paradigma de modelación que se usa en este trabajo de tesis, los autómatas celulares.

Capítulo 3 AUTÓMATAS CELULARES Y CONCEPTOS RELACIONADOS

Resumen: Con la finalidad que el lector comprenda mejor el modelo que se propone en este trabajo de tesis, en este capítulo se introducen los conceptos relacionado a los Autómatas Celulares (AC).

3.1. Autómatas celulares

Los autómatas celulares como marco para el estudio de los sistemas complejos surgen en los años 40s, cuando John Von y Van Neumann desarrollaron una teoría de máquinas autorreplicables [9]. En términos generales, los AC son sistemas dinámicos discretos tanto en el espacio como en el tiempo, cuyas variables toman valores en un conjunto finito de posibles estados. El estado de cada celda o célula se cambia en el tiempo, con base en una función de transición que toma en cuenta el estado de la célula misma y de un conjunto de células que les rodea (vecindad) [10]. Una de las características más importante es que permiten capturar comportamientos microscópicos que son determinantes del comportamiento global del sistema bajo el estudio.

3.2. Componentes de autómatas celular

Los autómatas celulares se componen de un conjunto de elementos que es fundamental conocer para poder modelar con ellos y que se definen a continuación.

- **Arreglo Regular:** Se refiere al espacio de evolución en un plano de 2 dimensiones o en un espacio de n dimensiones. Se utiliza el término célula para referirse a cada una de las divisiones homogéneas que conforman el arreglo.
- **Conjunto de Estados:** Es un conjunto finito y cada célula del arreglo toma un valor de este conjunto de estados. También se le conoce como alfabeto y puede representarse mediante un valor o característica.
- **Configuración Inicial:** Se asigna un estado a cada una de las células en el espacio de evolución del sistema.
- **Vecindad:** Define el grupo de células adyacentes y sus posiciones relativas. Dependiendo del tipo de autómatas celular, la vecindad puede ser definida de diferentes maneras. Por ejemplo, en un autómatas celular unidimensional, la vecindad puede ser definida como la celda a la izquierda y la celda a la derecha de una celda determinada. En un autómatas celular bidimensional, la vecindad puede ser definida como las ocho celdas adyacentes a una celda determinada (arriba, abajo, izquierda, derecha y las cuatro diagonales). La definición de la vecindad es importante porque determina cómo las celdas interactúan entre sí y cómo se propagan las actualizaciones a través del autómatas celular.

- **Función Local:** La regla de evolución de los autómatas celulares es un conjunto de normas que determinan su evolución en el tiempo. Esta regla utiliza información de las células vecinas que rodean la célula central. Es esta función la que define cómo cambia el estado de cada célula en función del estado anterior de las células vecinas. Esta función puede ser expresada algebraicamente con una expresión [9].

Los modelos de AC son interesantes debido a la rapidez con la que muestran resultados y generan comportamientos a partir de dinámicas complejas durante su ejecución. Esto permite observar fenómenos fascinantes.

3.3. Definición formal

Se llama un AC d-dimensional al conjunto de células uniformemente distribuidas en un espacio de d dimensiones. Cada célula tomará un valor discreto dentro de un conjunto de K estados posibles, el cual se cambiará cada instante de tiempo de una manera síncrona mediante una función de transición que toma en cuenta como entrada, el estado de la célula y de un conjunto de células vecinas en las que interacciona [11], [12], [13], [14].

Formalmente, los autómatas celulares pueden definirse como una cuádrupla **(L, S, N, \emptyset)** tal que:

- **L** es la disposición de las celdas que componen el espacio dimensional, i indica la posición de la celda.
- **S** es un conjunto limitado de opciones o estados que una celda puede tomar en un momento determinado (con valores de 0 a $k - 1$):

$$S = \{0, 1, \dots, k - 1\}$$
- **N** es un conjunto de números que se utilizan para definir la vecindad de una celda en un contexto determinado $N = \{-r, \dots, 0, \dots, r\}$ de cardinalidad $|N| = 2r + 1 = n$, el valor de r especifica cuantas celdas hacia adelante y hacia atrás se ven afectadas por el estado de una celda en particular de L . El estado $i \in L$ se ve influenciado por el estado de todas las celdas $i + c$, para toda $c \in N$.
- $\emptyset: S^n \rightarrow S$ la función de transición local en cada celda se refiere a cómo se cambia la configuración de una celda en cada paso de tiempo. La regla de transición para cada celda depende del tipo de red, el radio de vecindad y los estados de las celdas vecinas.

- S^n es un conjunto finito que contiene todas las posibles combinaciones de estados de un elemento, como los $n - 1$ elementos de sus vecinos.

En un autómata celular unidimensional, los estados de cada célula se calculan mediante la aplicación repetida de una función de mapeo ϕ al tiempo, considerando la vecindad de las células adyacentes (definida por la regla del autómata celular).

$$\alpha_i^{(t)} = \phi(\alpha_{i-r}^{(t-1)}, \alpha_{i-r+1}^{(t-1)}, \dots, \alpha_i^{(t-1)}, \dots, \alpha_{i+r}^{(t-1)})$$

En el cual $\alpha_i^{(t)}$ es el nuevo estado en la celda i al tiempo de evolución t y $2r$ es el número de vecinos de la celda.

3.3.1. Limitaciones de la frontera

Las condiciones de frontera son muy importantes en la evolución de un autómata celular finito y pueden afectar su comportamiento de diferentes maneras. También es cierto que existen diferentes tipos de condiciones de frontera que se pueden aplicar: bordes periódicos y bordes absorbentes.

En el caso de los **bordes periódicos**, las celdas de la malla se conectan como si formaran un bucle, es decir, la última celda de una fila se conecta con la primera celda de la siguiente fila y así sucesivamente, creando una especie de continuidad en la malla. De esta forma, se pueden simular sistemas que tienen una estructura cíclica o periódica (Figura 3).

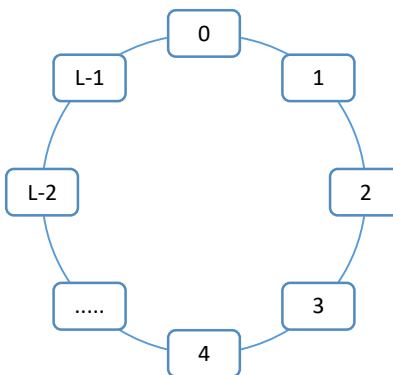


Figura 3: Se especifica que la primera celda del modelo está conectada con la última, lo que se conoce como una condición de frontera periódica.

Los **bordes absorbentes** son aquellos en los que las celdas de la malla que se encuentran en el límite de la simulación actúan como si no hubiera nada más allá de ellas. Este tipo de borde se utiliza cuando se quiere simular un sistema no cerrado o cuando no se desea que los bordes afecten el comportamiento del sistema, tal como se observa en la Figura 4.



Figura 4: Autómata celular con borde absorbente.

Los AC se caracterizan por su capacidad para simplificar la aritmética y realizar cálculos en paralelo, lo que resulta en reducciones significativas en la complejidad de los problemas de simulación. Además, los AC tienen una amplia variedad de aplicaciones en campos como la física, la biología y la informática [13], [16], [17], [18].

3.4. Usos y aplicaciones

Los autómatas celulares son una herramienta muy versátil y han sido aplicados con éxito en diversas disciplinas. Por ejemplo, en Física, son una técnica muy útil para simular fenómenos en dinámica de fluidos. También en Biología, los AC representan una alternativa muy interesante al modelado con ecuaciones diferenciales para el estudio de sistemas complejos, lo cual se demostró a mediados de los años 80. En el año 1986, Wolfram escribió la publicación Teoría y Aplicación de los Autómatas Celulares, lo que generó un gran interés en la técnica de modelización y simulación [13]. Al mismo tiempo, Langton propuso el uso de los autómatas celulares como técnica principal para el estudio de la vida artificial [16].

La facilidad para realizar simulaciones es la razón principal por la que los autómatas celulares se han vuelto ampliamente utilizados en diversas disciplinas a finales de los años 90. En particular, han sido muy útiles en el estudio de sistemas biológicos.

En la actualidad, los científicos de la computación pueden utilizar los AC para crear modelos que les permiten estudiar de manera sencilla el procesamiento de información en paralelo y desarrollar computadoras con arquitecturas que utilizan principios y materiales biológicos.

Estos modelos son perfectos para plantear sistemas complejos y luego estudiar su funcionamiento a gran escala mediante simulaciones, como el flujo de vehículos en una carretera [17].

Específicamente, los AC permiten representar el fenómeno con un nivel de detalle tal que se enfoca en el comportamiento individual de cada vehículo que transita por una vía de transporte.

Los métodos de modelos de tráfico vehicular basados en AC se han consolidado como una herramienta eficaz para modelar, analizar y comprender el comportamiento del tráfico real, incluso para predecir su rendimiento. Esto se debe a que las reglas que rigen la dinámica de los vehículos son sencillas, fáciles de comprender, eficientes en términos computacionales y suficientes para simular el comportamiento observado en las carreteras [18].

En este proyecto de investigación se presenta una propuesta de un modelo basado en el paradigma de los Autómatas Celulares para el estudio y análisis del tráfico vehicular.

El tráfico vehicular es un problema cada vez más común en las ciudades, y que afecta tanto a conductores como a peatones. Para entender y solucionar este problema, es importante conocer algunos conceptos relacionados con el tráfico vehicular y su modelación basada en AC.

Capítulo 4 ANÁLISIS DE TRÁFICO

Resumen: Los modelos de tráfico vehicular tienen la capacidad de recrear eventos de tráfico precisos como la transición de flujo libre a la congestión, la inversión de carril y la formación de pelotones. Debido a esto, los modelos AC han sido muy utilizados en la simulación de flujo de tráfico real, demostrando un alto rendimiento en simulaciones por computadora.

En este ídem se aborda la teoría del flujo vehicular, incluyendo sus principios y conceptos fundamentales.

4.1. Tráfico

El tráfico o tránsito vehicular es la situación en la que se produce un flujo continuo de vehículos en una vía o carretera. Esta situación puede generar congestión vehicular, especialmente cuando hay una alta concentración de vehículos y semáforos, o cuando las carreteras tienen deficiencias [19].

El tráfico vehicular se ha convertido en una parte fundamental de la vida diaria de las personas y como la demanda de automóviles sigue en aumento, muchos países desarrollados han visto los límites de este crecimiento y como esto ha llevado a problemas de congestión en las vías.

4.1.1. Congestión vehicular

La congestión vehicular ocurre cuando existe una saturación producida por el exceso de vehículos en las vías, lo que produce un incremento en los tiempos de viaje e inconvenientes para circular, generalmente ocurre durante las llamadas horas pico, cuando la mayoría de personas conducen a un destino común [20]. Esto puede ser causado por un accidente en la carretera, el daño de algún vehículo que circulaba por la vía, e incluso por el clima. La congestión vehicular es muy común en los centros de las ciudades, especialmente durante los días festivos y épocas especiales.

Ante esta situación, una alternativa es buscar nuevas soluciones orientadas a un uso más eficiente de las infraestructuras existentes. Sin embargo, probar los impactos de estas nuevas soluciones en el mundo real y antes de su implementación final resulta muy costoso, por lo que los modelos basados en simulación computacional para tráfico vehicular resultan de gran ayuda y su uso ha tomado mucho auge en los últimos años, gracias a la aparición de computadoras cada día más potentes.

A continuación, se presenta una breve introducción a la modelación y simulación del tráfico vehicular y algunos conceptos relacionados para su entendimiento.

4.1.2. Elementos del tráfico vehicular

A continuación, se presentan varias definiciones de uso común, empleadas por diferentes autores para describir modelos de flujo vehicular [19], [20]. Entre las definiciones más importantes destacan:

- **Flujo vehicular:** El flujo vehicular es una medida que se utiliza para conocer el número de vehículos que circulan por un punto determinado en una unidad de tiempo específica, por lo general se expresa en vehículos por hora (veh/h).
- **Velocidad:** La velocidad es la medida del cambio de posición de un vehículo durante un período específico de tiempo y se expresa típicamente en kilómetros por hora (km/h).
- **Tiempo de viaje:** Es la cantidad de tiempo que toma un vehículo para recorrer una ruta específica. Este tiempo se calcula dividiendo la distancia total del recorrido y la velocidad del vehículo.
- **Densidad:** La densidad del tráfico se refiere a la cantidad de vehículos que se encuentran en una distancia específica en un momento determinado, medida comúnmente en términos de vehículos por kilómetro (veh/km).

La gestión del tráfico vehicular se ha convertido en una preocupación creciente en las ciudades debido al aumento constante del parque automotor y la clara relación entre la congestión vehicular y la calidad de vida de los ciudadanos. Para abordar este desafío, se utilizan diferentes herramientas y técnicas, entre las cuales se destacan los diagramas y las etapas del tráfico vehicular.

4.2. Diagrama y etapas del tráfico vehicular.

Según la investigación de Boris Kerner [18], es posible identificar tres fases del flujo vehicular en el diagrama fundamental.

- **Flujo libre:** Los conductores tienen la libertad de elegir su velocidad, lo que significa que la velocidad no dependerá de la densidad de los vehículos. Esto se debe a suficiente espacio disponible para cada vehículo. El flujo libre F se aprecia en la Figura 5.
- **Congestionamientos en movimiento:** Son zonas con alta densidad de vehículos y baja velocidad promedio, también conocidos como flujo estancado. Estas zonas tienen un ancho mayor en el centro y se estrechan hacia los extremos, lo que produce cambios bruscos de velocidad en los vehículos. El flujo de salida de los congestionamientos no depende del flujo de entrada y su densidad es una de sus principales características [21].
- **Flujo sincronizado:** El flujo sincronizado es un estado del tráfico en el que los vehículos se mueven a una velocidad más baja de lo normal, pero la cantidad de

vehículos que se mueven en una dirección es mayor de lo que se puede ver en un atasco de tráfico normal. Además, en este estado, no hay una relación clara entre la densidad del tráfico y el flujo vehicular, lo que significa que los datos se distribuyen de manera irregular(ver Figura 5).

Cada fase del tráfico tiene su propia estrategia de manejo. Durante la fase de flujo libre, los conductores tienen como principal objetivo conducir a la velocidad más alta posible, y por lo general, tienen interacciones mínimas entre ellos. En esta fase, la carretera está despejada y los conductores tienen la oportunidad de disfrutar de una experiencia de conducción más libre y sin restricciones. Durante la fase de congestión, el objetivo principal de los conductores es evitar accidentes, lo que afecta significativamente su comportamiento al volante. En estas condiciones, la atención se centra en la seguridad y en la necesidad de estar alerta ante cualquier situación inesperada, lo que puede resultar en una conducción más lenta y cautelosa.

A medida que los conductores avanzan a la fase de flujo sincronizado, su prioridad principal es lograr una experiencia de manejo más suave y cómoda. En este punto, es crucial que el vehículo se adapte perfectamente a las condiciones del tráfico y que el conductor pueda disfrutar de una sensación de control y fluidez en su conducción.

El diagrama fundamental es una representación gráfica que muestra la relación entre el flujo vehicular, la densidad y la velocidad en una vía o carretera. Es considerado uno de los criterios más importantes para evaluar si un modelo de tráfico es capaz de reproducir adecuadamente el comportamiento real del flujo vehicular.

En el eje horizontal se representa la densidad de vehículos, es decir, la cantidad de vehículos por unidad de longitud de la vía. En el eje vertical se representa el flujo vehicular, que es la cantidad de vehículos que pasan por un punto de la vía en un determinado intervalo de tiempo.

La relación entre estos dos parámetros se establece mediante una curva que muestra cómo varía el flujo vehicular a medida que aumenta o disminuye la densidad.

En un diagrama fundamental típico, se observa que a baja densidad, el flujo vehicular aumenta a medida que la densidad se incrementa, ya que hay más espacio disponible para que los vehículos se desplacen a una mayor velocidad. Sin embargo, a medida que la densidad continúa aumentando, llega un punto en el que el flujo vehicular alcanza su máximo, conocido como flujo máximo.

A partir de ese punto, a medida que la densidad sigue aumentando, el flujo vehicular comienza a disminuir debido a la congestión del tráfico.

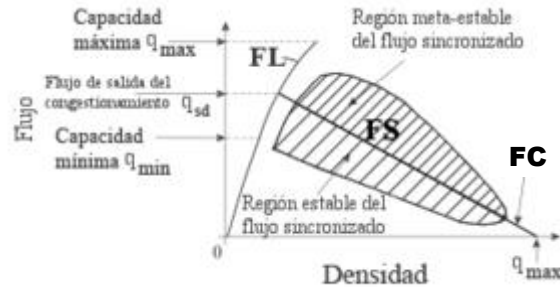


Figura 5: Las tres fases del tráfico: flujo libre (FL), flujo sincronizado (FS) y flujo congestionado (FC) en el plano flujo-densidad. Fuente [22].

La modelación es una herramienta fundamental en diversas disciplinas que nos permite entender y analizar fenómenos complejos de manera simplificada. Existen diferentes enfoques de modelación que se utilizan para abordar distintos tipos de problemas. Estos enfoques nos ayudan a plantear y resolver preguntas específicas, y a tomar decisiones informadas.

4.3. Enfoques de modelación

El movimiento de vehículos en carreteras puede examinarse a diferentes escalas y recibir diferentes explicaciones según la escala elegida. Por ejemplo, si observamos el movimiento de los vehículos a gran escala, tendremos una situación en la que se observa el movimiento global y no podemos distinguir entre automóviles individuales. De manera similar, al observar el movimiento de vehículos individuales se pierde la vista completa de los fenómenos.

Brevemente, podemos enumerar tres enfoques para estudiar la dinámica del flujo vehicular.

- **Enfoque Microscópico:** En el análisis microscópico del flujo vehicular, se examinan minuciosamente todas las variables que describen el comportamiento del tráfico. Esto incluye la medición precisa de la distancia entre los vehículos, la densidad y velocidad del flujo vehicular, así como la aceleración y la distancia de seguimiento. El modelo obtenido depende del número de variables obtenidas para encontrarlo [23]. Bajo un enfoque microscópico, cada vehículo puede seguir su trayectoria a lo largo de la carretera, lo que nos permite estudiar la dinámica de un conjunto de vehículos, siguiendo reglas particulares para su movimiento [24], [25]. Diversos modelos microscópicos tanto continuos como discretos que se han desarrollado, entre estos sobresalen los nombrados modelos car-following [26] y los basados en autómatas celulares [27].
- **Enfoque Macroscópico:** Se refiere a la observación y análisis del flujo vehicular a gran escala, es decir, a nivel de una red de carreteras o de una ciudad entera. En este enfoque se consideran variables como la velocidad media, la densidad vehicular y el caudal vehicular, entre otras, para obtener una visión general del tráfico y poder tomar decisiones estratégicas en cuanto a la gestión del tráfico.

Para poder obtener una medida representativa del flujo, es importante considerar una gran cantidad de vehículos y variables como la densidad y la velocidad

El enfoque macroscópico del análisis del flujo vehicular cuenta con diversas ventajas que lo hacen una herramienta muy útil [23]. En primer lugar, los resultados que se obtienen con este enfoque proporcionan un análisis del tráfico vehicular, lo que permite tener una visión general del tráfico en una determinada zona. Además, otra ventaja importante es que el enfoque macroscópico permite analizar el flujo vehicular en muchos carriles, lo que es muy útil en carreteras y vías con múltiples carriles. Por último, cabe destacar que el enfoque macroscópico es más eficiente computacionalmente, lo que significa que el análisis puede realizarse de una manera más rápida y eficiente. Así, los modelos de tráfico macroscópico son más generales y requieren menos recursos de cómputo que los modelos microscópicos y los mesoscópicos.

- **Enfoque Mesoscópico:** El enfoque mesoscópico, combina características del enfoque macroscópico y del enfoque microscópico. En este enfoque, los vehículos son definidos de manera individual, su conducta se rige por probabilidades. Es decir, se analiza la probabilidad de que un vehículo con una determinada velocidad se encuentre en una posición y tiempo específicos. Se utiliza la ecuación cinética de los gases como base para este enfoque que describe cómo se mueven las partículas en un gas en términos de sus posiciones y velocidades. De esta manera, la aplicación del enfoque mesoscópico permite tener una visión más detallada del comportamiento del tráfico, sin llegar a la complejidad del enfoque microscópico. Por lo tanto, el enfoque mesoscópico resulta beneficioso para entender el flujo vehicular y para la planificación de medidas que mejoren la movilidad de los vehículos [28].

El desempeño de los conductores y los vehículos se describen en términos agregados y no de forma individual (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, ejemplo de 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.

En el siguiente capítulo 5 se introducen los modelos de tráfico vehicular basados en Autómatas Celulares y se explica su importancia para el entendimiento del trabajo de tesis. Estos modelos permiten analizar y evaluar el modelo de AC propuesto en la tesis, ofreciendo una visión detallada del comportamiento del tráfico y la simulación de diferentes escenarios. Conocer estos modelos es esencial para la correcta interpretación y aplicación del modelo propuesto en la tesis.

Capítulo 5 MODELOS DE TRÁFICO VEHICULAR BASADOS EN AUTÓMATAS CELULARES

Los modelos basados en Autómatas Celulares son ampliamente utilizados para modelar y analizar el tráfico vehicular, lo que permite comprender y predecir el rendimiento del tráfico real. Estos modelos son un método establecido y reconocido para la modelización del tráfico vehicular y son mencionados en diversas fuentes [29] [30], [31], [32], [33].

La principal característica de los modelos basados en Autómatas Celulares es el uso de reglas locales, lo que les permite modelar de manera natural y eficiente aspectos complejos del comportamiento tanto de los vehículos como de los conductores. Esta metodología permite una descripción detallada del tráfico vehicular y brinda la posibilidad de simular diferentes escenarios, lo que resulta fundamental para la planificación y gestión del tráfico. La capacidad de modelar de manera eficiente los aspectos complejos del comportamiento de los vehículos y conductores hace que los modelos de Autómatas Celulares sean una herramienta importante para el estudio del tráfico vehicular.

Los estudios realizados hasta ahora indican que los modelos que se fundamentan en AC son pertinentes en la planificación del diseño de carreteras y redes urbanas, en el análisis de su funcionamiento y en la identificación de las posibles causas de congestión. Además, estos modelos pueden proponer cambios o ajustes que resultan fundamentales para la elaboración de una tesis en este tema.

El capítulo siguiente se centrará en la descripción de algunos modelos de tráfico vehicular basados en Autómatas Celulares, los cuales son esenciales para comprender y desarrollar la tesis.

5.1. Modelo NaSch

El modelo Nagel-Schreckenberg, propuesto en 1992 por Kai Nagel y Michael Schreckenberg, fue el primer modelo en utilizar Autómatas Celulares para la modelación del tráfico vehicular.

El modelo NaSch es capaz de capturar ciertos aspectos básicos de la dinámica del tráfico vehicular. Además, el modelo logra reproducir de manera cercana a la realidad aspectos complejos del comportamiento del conductor, lo que se traduce en una mejor aproximación de los eventos que suceden en el tráfico vehicular [34], [35], [36].

5.1.1. Conceptualización del modelo Nagel-Schreckenberg

El modelo desarrollado por Nagel y Schreckenberg [33] presenta una propuesta de un modelo de AC basado en probabilidades. Este modelo se compone de una estructura unidimensional que consta de L celdas. En dicha estructura se distribuyen N vehículos que se mueven en una única dirección y bajo condiciones de frontera periódicas.

El modelo establece que cada celda del arreglo puede estar en estado vacío o tener solo un vehículo. Además, se establece que la longitud (Δx) de cada celda es aproximadamente de 7.5 metros, que es equivalente al espacio ocupado por un vehículo en un congestionamiento, más la distancia que lo separa de su vehículo vecino más cercano.

En el modelo, se establece que los vehículos se desplazan en pasos discretos con una velocidad v . Esta velocidad puede variar en un rango de valores discretos que van desde $v = 0, \dots, v_{max}$. Es importante destacar que en la versión más simple del modelo, todos los vehículos comparten la misma velocidad límite v_{max} .

La representación gráfica de lo mencionado se muestra en la Figura 6.

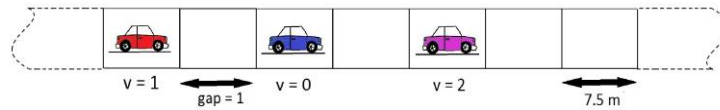


Figura 6: Caso ilustrativo representando una sección de calle mediante el modelo NaSch, el cual se basa en AC.

El modelo establece que cada celda puede estar en estado vacío o tener un vehículo, los cuales se desplazan de izquierda a derecha con una velocidad v . En este contexto, cada celda representa una distancia real de 7.5 metros y el espacio entre vehículos, conocido como gap, se mide en término del número de celdas que separan a cada vehículo.

El modelo evoluciona en pasos discretos (Δx) que corresponden a un segundo. Por lo tanto, las transiciones de cambio del sistema se realizan de $t \rightarrow t + 1$. Además, con los parámetros determinados para Δx y Δt , $v = 1$ se refiere al movimiento de un vehículo a la celda vecina en la dirección del flujo vehicular, lo cual equivale a una velocidad de 27 km/h en unidades. Se establece que la velocidad máxima permitida es $v_{max} = 5$, lo que equivale a 135 km/h.

En el marco de los autómatas celulares, es común omitir las unidades propias debido a la discretización del espacio y del tiempo. En consecuencia, se requiere establecer las unidades adecuadas para el modelo, las cuales son $d = \text{número de celdas}$, $v = \text{número de celdas por paso de tiempo}$, $t = \text{número de pasos de tiempo}$, etc. Por ende, $v < d$ se hace uso con frecuencia en vez de $v < d/\Delta t$, pues $\Delta t = 1$.

Si tomamos en cuenta la velocidad actual y posición de un vehículo i , denotados por v_i y x_i respectivamente, y la posición del vehículo que lo precede, x_p , en un tiempo determinado, la distancia que separa a ambos vehículos en términos de celdas vacías se representa por d_i , es decir, $d_i := x_p - x_i - 1$.

Es necesario definir un conjunto de reglas que permitan la transición de estado, es decir, el cambio de velocidad y posición de los vehículos en cada paso de tiempo $t \rightarrow t + 1$.

Paso S1: Aceleración:

En caso de que $v_i < v_{max}$, la velocidad del vehículo i aumenta en uno, esto es:

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

La suposición de esta regla es que cada conductor conducirá a la máxima velocidad posible sin sobrepasar el límite de velocidad establecido.

Paso S2: Desaceleración:

Si $d_i < v_i$, la velocidad del vehículo i disminuye a d_i . Entonces, la velocidad actual del vehículo i es:

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

De esta manera se asegura que no haya choques entre los automóviles.

Paso S3: Desaceleración aleatoria:

En caso de que $v_i > 0$, la velocidad del vehículo i disminuye de manera aleatoria con una probabilidad R , lo que significa que.

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

Es necesario incluir la aleatoriedad en el modelo para lograr una simulación precisa del tráfico vehicular, ya que, de lo contrario, el movimiento de los vehículos sería totalmente predecible. Se consideran las variaciones naturales en la velocidad como resultado del comportamiento humano y factores externos en esta regla. En ausencia de aleatoriedad, todas las disposiciones iniciales de los vehículos con sus respectivas velocidades llegarían a un estado estable en poco tiempo (Nagel y Schreckenberg, 1992 [27]).

Paso S4: Desplazamiento del vehículo:

En otras palabras, cada vehículo avanza según la velocidad calculada en los pasos 1-3.

$$x_i \rightarrow x_i + v_i.$$

Es importante seguir un orden específico al aplicar las reglas de transición mencionadas en cada celda para que el modelo conserve sus propiedades.

Los elementos que definen el modelo NaSch son los siguientes parámetros: la velocidad máxima que puede alcanzar cada vehículo v_{max} , un valor r que se utiliza como parámetro y la densidad total de vehículos en la carretera ρ .

Desde que fue implementado por primera vez, el modelo NaSch ha permitido simular volúmenes de tráfico bastante altos, llegando a realizar una gran cantidad de actualizaciones en tan sólo un segundo [37]. No obstante, una desventaja del modelo es que la dinámica de los vehículos no es fiel a la realidad.

Los vehículos presentes en las celdas tienen tasa de aceleración y desaceleración poco realistas, ya que aceleran de manera uniforme sin importar su velocidad actual y pueden cambiar bruscamente de velocidad en intervalos de aproximadamente 27 kilómetros por hora.

Adicionalmente, se ha observado que los vehículos pueden frenar de su velocidad máxima total de 135 km/h a 0 km/h en un solo segundo esto debido a que no toma en cuenta factores importantes que influyen en el flujo de tráfico de la vida real como las características de los vehículos y la diversidad de comportamiento y decisiones de los conductores [38], lo que contribuye a generar patrones de desaceleración inestables [35], [39].

En contraposición, la discretización de las celdas en intervalos de 7.5 metros se considera una limitación muy rudimentaria y poco adecuada para enfrentar problemas de tráfico reales.

Esto conlleva a que, a pesar de que el modelo pueda imitar algunos aspectos relevantes de la dinámica vehicular a nivel microscópico, su excesiva simplificación también es evidente. Es por eso que se han realizado múltiples intentos para perfeccionarlo.

Desde su creación, se han generado una cantidad significativa de adaptaciones y extensiones, tal como se puede apreciar en [27], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46].

5.2. Modelo LAI

En 2010, con el objetivo de optimizar el rendimiento de los modelos de AC, se propuso el así llamado modelo LAI en [35], el cual considera limitaciones en la aceleración y desaceleración y distancias de seguridad, que toman en cuenta para su definición diferencias de velocidad entre los vehículos acordes a las capacidades mecánicas de los vehículos y el comportamiento del conductor. Aunque el modelo reproduce de manera muy simple el desempeño de la dinámica vehicular y de los conductores en forma realista y reproduce de manera natural diferentes fenómenos que se observan en el tráfico vehicular real, el modelo LAI no es adecuado cuando se considera el tráfico con vehículos de variadas capacidades de aceleración. Así recientemente, en [47] [48], fue propuesto un modelo probabilístico que utiliza AC para el tráfico vehicular mixto en carreteras, llamado LAI-E (basado en el modelo

LAI). Este modelo fue creado con el fin de evitar comportamientos de frenado poco realistas desde una perspectiva detallada del tráfico vehicular.

5.3. Modelo LAI mejorado (LAI-E)

El modelo LAI-E es una herramienta de modelación que utiliza AC para representar en detalle el tráfico vehicular de vehículos convencionales heterogéneos [49]. Este modelo se enfoca específicamente en una perspectiva microscópica del tráfico vehicular para lograr una representación más precisa de la situación [48].

Según el modelo LAI-E [47], el desplazamiento de los vehículos se describe mediante MUA (Movimiento Uniformemente Acelerado), como base fundamental para su funcionamiento, descrito más adelante. El objetivo de este modelo es mantener las capacidades de aceleración y desaceleración dentro de ciertos límites establecidos por las características reales de los vehículos, para así conseguir una representación más realista del comportamiento del tráfico vehicular en la carretera.

Las características del modelo LAI-E son:

- El sistema experimenta cambios y evolución en intervalos de un segundo, lo que significa que su comportamiento es actualizado en cada paso de ese mismo tiempo.
- Dentro de este modelo, se toma en cuenta un tiempo de reacción de un segundo, que es el tiempo promedio que un conductor tarda en ajustar su comportamiento ante cambios repentinos en las condiciones del tráfico
- En este modelo, los vehículos tienen la capacidad de acelerar (acc), desacelerar (dec) o mantener su velocidad (keep) en situaciones normales de tráfico. Sin embargo, en casos extremos se aplicará el frenado de emergencia para prevenir accidentes o riesgos para la seguridad. De esta manera, se busca representar de manera más precisa el comportamiento real de los vehículos en circunstancias diversas y variadas.
- Una característica de este modelo es establecer distancias seguras entre los vehículos, incluso en situaciones de emergencia, donde el vehículo líder desacelera bruscamente y obliga al vehículo seguidor a frenar de manera similar en el siguiente paso de tiempo para evitar una colisión.
- Con base en las distancias seguras definidas, se determina cuál de las tres acciones (acelerar, desacelerar o mantener la velocidad) deben tomar los vehículos, con el fin de mantener la idea central de que los conductores toman decisiones que dependen de su velocidad, capacidad de aceleración/desaceleración y posición en relación al vehículo de adelante, todo en función de criterios de seguridad.

- Se parte del supuesto de que los vehículos se desplazan siguiendo un movimiento uniformemente acelerado. Este enfoque se eligió porque se considera que este tipo de movimiento es más cercano a la realidad y se ajusta mejor a la forma en que los vehículos se mueven en las carreteras y calles, a diferencia de la mayoría de los modelos de autómatas celulares que usan movimiento impulsivamente acelerado (cambios instantáneos de velocidad).
- Este modelo mantiene las capacidades reales de aceleración y desaceleración de los vehículos.

Los cálculos que describen al modelo LAI-E son los siguientes:

El modelo asume que los vehículos siguen un movimiento uniformemente acelerado (MUA). Por lo tanto, para describir la evolución en el tiempo de la posición y velocidad de cada vehículo n , se utilizan las variables x_n y v_n , respectivamente.

$$X_{n_t} = X_{n_0} + V_{n_0} t + \frac{1}{2} a_n t^2 . \quad (1)$$

$$v_{n_t} = v_{n_0} + a_n t. \quad (2)$$

El modelo utilizado considera que cada vehículo tiene una posición y velocidad iniciales, representadas por las variables x_{n_0} y v_{n_0} , respectivamente, y una aceleración a_n . Es importante destacar que en el modelo se asume que los vehículos se desplazan en una única dirección y no es posible que retrocedan. Por lo tanto, las ecuaciones (1) y (2) sólo son aplicables en situaciones donde el vehículo acelera o frena mientras se mueve hacia adelante o se detiene por completo. Además, se define la variable t_{nb} como el tiempo que tarda el vehículo n en frenar por completo ecuación (2), desacelerando con una capacidad a_n , tal y como se describe en la ecuación correspondiente.

$$t_{nb} = -\frac{v_{n_0}}{a_n} \quad (3)$$

A continuación se establecen las distancias consideradas seguras para mantener la distancia entre vehículos [47].

Variable

x_{n_t}	Posición del vehículo n en el instante de tiempo t .
v_{n_t}	Velocidad del vehículo n en el instante de tiempo t .
a_{1_n}	Aceleración normal del vehículo n en el instante de tiempo t .
a_{max_n}	Máxima capacidad de desaceleración del vehículo n en el instante de tiempo t .

El análisis se centra en dos vehículos contiguos viajando en el mismo carril, se utilizan los subíndices l y f para referirse al vehículo líder y al vehículo seguidor.

Para establecer las distancias de seguimiento seguras en este modelo, es necesario tener en cuenta dos situaciones en las que puede ocurrir una colisión.

El vehículo líder aplica frenado a máxima capacidad en el tiempo t y el vehículo seguidor detecta esta acción un segundo después. El objetivo de las distancias seguras es evitar colisiones que pudieran ocurrir en tiempos futuros si el vehículo seguidor se encuentra a una distancia menor a la de seguridad. Es posible visualizar dos escenarios:

- El vehículo líder frena totalmente y el seguidor queda justo atrás de él.
- El vehículo líder y el seguidor pueden tener una colisión con ambos en movimiento.

1.-Colisión con vehículo detenido: Una de las situaciones a considerar en el modelo es cuando el vehículo líder se detiene y el vehículo seguidor colisiona con él.

Se presenta la distancia de seguimiento segura que un vehículo seguidor debe mantener en caso de que el vehículo líder se detenga, con el fin de evitar una colisión. Esta distancia de seguimiento segura se modifica según la capacidad del vehículo seguidor para acelerar D_{acc}^{det} , mantener su velocidad actual D_{keep}^{det} o desacelerar D_{decc}^{det} hasta el siguiente intervalo de tiempo. Este modelo se encuentra detallado en [48].

$$D_{acc}^{det} = \left(\frac{(v_{f_t} + a_{f_t})^2}{2a_{max_f}} - \frac{(v_{l_t} - a_{max_l})^2}{2a_{max_l}} + \frac{(a_{max_l} + a_{f_t})}{2} - (v_{l_t} - v_{f_t}) + l_f \right). \quad (4)$$

$$D_{keep}^{det} = \left(\frac{(v_{f_t} + a_{f_t})^2}{2a_{max_f}} - \frac{(v_{l_t} - a_{max_l})^2}{2a_{max_t}} + \frac{(a_{max_l})}{2} - (v_{l_t} - v_{f_t}) + l_f \right). \quad (5)$$

$$D_{dec}^{det} = \left(\frac{(v_{f_t} + a_{f_t})^2}{2a_{max_f}} - \frac{(v_{l_t} - a_{max_l})^2}{2a_{max_l}} + \frac{(a_{max_l} - a_{f_t})}{2} - (v_{l_t} - v_{f_t}) + l_f \right). \quad (6)$$

2.-Colisión con vehículos en movimiento: Otra de las situaciones que hay que considerar en este modelo es cuando ambos vehículos se encuentran en movimiento y la colisión ocurre sin que ninguno de ellos se haya detenido por completo. Este escenario se describe en [48].

Cuando se consideran vehículos con diferentes capacidades de desaceleración, se puede producir una colisión mientras ambos vehículos se encuentran en movimiento. En este caso, la distancia de seguimiento segura que debe mantener el vehículo seguidor dependerá de la acción que tome para evitar la colisión: acelerar (D_{acc}^{mov}), mantener la velocidad actual (D_{keep}^{mov}) o desacelerar (D_{decc}^{mov}). Para cada una de estas acciones, se deben tener en cuenta los valores de D^{mov} correspondientes, que se detallan en [48].

$$D_{acc}^{mov} = \left(\frac{a_{max_l} + a_{f_t}}{2} - \frac{(v_{l_t} - a_{max_l} - (v_{f_t} + a_{f_t}))^2}{2(a_{max_l} - a_{max_f})} - (v_{l_t} - v_{f_t}) + l_f \right). \quad (7)$$

$$D_{keep}^{mov} = \left(\frac{a_{max_l}}{2} - \frac{(v_{l_t} - a_{max_l}(v_{f_t}))^2}{2(a_{max_l} - a_{max_f})} - (v_{l_t} - v_{f_t}) + l_f \right). \quad (8)$$

$$D_{dec}^{mov} = \left(\frac{a_{max_l} - a_{f_t}}{2} - \frac{(v_{l_t} - a_{max_l} - (v_{f_t} - a_{f_t}))^2}{2(a_{max_l} - a_{max_f})} - (v_{l_t} - v_{f_t}) + l_f \right). \quad (9)$$

5.3.1 Actualización del modelo LAI-E

Las reglas para actualizar el modelo planteado por [47] se definen de la siguiente manera:

Paso S1

S1 determina las distancias D^{det} y D^{mov} .

Sea $\tilde{\tau}$ un valor crítico, dado de la siguiente manera:

$$\tilde{\tau} = \frac{(v_l - v_f)}{(a_{max_l} - a_{max_l})}$$

$\tilde{\tau}$ es un mínimo si se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} a_{max_l} - a_{max_f} &< 0 \\ v_l - v_f &< 0 \end{aligned}$$

Sea t_{b_l} y t_{b_f} el tiempo de frenado del vehículo, los plazos de tiempo seguro para frenar del vehículo antecesor y predecesor, respectivamente (ver detalles en [47]):

(i) Si $\tilde{\tau} < t_{b_l}$ y $\tilde{\tau} < t_{b_f}$ entonces,

$$D_{acc_f} = D_{mov}^{acc}$$

$$D_{keep_f} = D_{mov}^{keep}$$

$$D_{decc_f} = D_{mov}^{decc}$$

(ii) De otra manera

$$D_{acc_f} = D_{det}^{acc}$$

$$D_{keep_f} = D_{det}^{keep}$$

$$D_{decc_f} = D_{det}^{decc}$$

Paso S2

Se trata de una aceleración que se retrasa, para reproducir el fenómeno conocido como "slow to start" o arranque lento. Se busca obtener el valor adecuado del ruido estocástico R_a , el cual se basa en la velocidad actual del vehículo v_{f_t} .

$$R_a = \min(R_d, R_0 + v_{f_t} * (R_d - R_0)/v_s).$$

La velocidad v_s es un valor constante que se sitúa ligeramente por encima de cero.

Paso S3

Toma decisión sobre el movimiento de los vehículos de acuerdo a las distancias de seguridad calculadas en la regla S1. Supongamos que $a_{f_{t+1}}$ es la cantidad de celdas que aceleran/desaceleran los vehículos en el siguiente instante de tiempo. Para actualizar la velocidad de los vehículos en la carretera, se actualizan simultáneamente todos los puntos de la cuadrícula utilizando los criterios subsecuentes [47]:

(a): Aceleración. En caso de que, $d_t \in [d_{acc}, +\infty)$ se establece la nueva aceleración con probabilidad R_a , es decir:

$$a_{f_{t+1}} = \begin{cases} a & \text{si } \text{aleatorio}() \leq (R_a) \\ 0 & \text{de otro manera} \end{cases}$$

Donde $\text{aleatorio}() \in [0, 1]$ muestra un número aleatorio uniforme (vehículo f al tiempo t), donde a representa la aceleración calculada, y se toma $a = a_1$.

(b): Se produce una desaceleración aleatoria cuando d_t se encuentra en el intervalo $[d_{keep}, d_{acc})$ o cuando la velocidad del vehículo f alcanza la velocidad máxima, ($v_f = v_{max}$). En estos casos, la aceleración del vehículo f disminuye con una probabilidad R_s , en otras palabras:

$$a_{f_{t+1}} = \begin{cases} -a & \text{si } \text{aleatorio}() \leq (R_s) \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

(c): Desaceleración. Si $d_t \in [d_{decc}, d_{keep})$, el vehículo f reduce su velocidad por medio de una desaceleración en a_1 .

$$a_{f_{t+1}} = -a_1.$$

(d): En caso de una desaceleración de emergencia cuando $d_t < d_{decc}$, la aceleración del vehículo f se disminuye a un máximo de a_{max} .

$$a_{f_{t+1}} = -a_{max}.$$

Se entiende por $-a_{max}$ la mayor capacidad que tiene el vehículo f para reducir su velocidad en un solo paso de tiempo

Paso S4

La velocidad se actualiza en función de la aceleración más reciente:

$$v_{f_{t+1}} = \min(\max(0, v_{f_t} + a_{f_{t+1}}), v_{max}).$$

Paso S5

La representación del movimiento uniformemente acelerado se puede expresar de la siguiente manera:

(i) Si ($a_{f_{t+1}} \geq 0$) $x_{f_{t+1}} = x_{f_t} + v_{f_t} + \frac{1}{2}a_{f_{t+1}}$.

(ii) De otra manera,

$$x_{f_{t+1}} = [x_{f_t} + v_{f_t}t_m + \frac{1}{2}a_{f_{t+1}}t_m^2].$$

En relación con la condición (ii), el tiempo t_m se refiere al instante en que el seguidor detiene su movimiento, es decir, $t_m = \min(1, \text{abs}(\frac{v_{f_t}}{a_{f_{t+1}}}))$ y $a_{f_{t+1}} \in \{-a_1, -a_{max}\}$

En el modelo, las variables x_{f_t} y v_{f_t} representan la posición y velocidad del vehículo f en el momento t . Es importante tener en cuenta que la condición (ii) en el paso S5 se debe al uso de aritmética entera en el modelo, lo que puede resultar en un movimiento uniformemente acelerado que indica una velocidad mayor en tiempos fraccionarios en comparación con tiempos enteros [47].

A partir de estos cálculos, se pueden elaborar tablas predefinidas que contengan las distancias seguras para la aceleración, el mantenimiento de velocidad y la desaceleración en consideración de todas las combinaciones posibles de vehículos líderes y seguidores. Al utilizar tablas de acceso, se puede considerar que el costo de calcular distancias seguras de seguimiento es bastante bajo [47].

5.3.2 Limitaciones

Aunque el modelo LAI-E ha mostrado es muy adecuado para modelar la dinámica de vehículos con diferentes características mecánica y físicas, el modelo LAI-E maneja un tiempo de reacción de un segundo; que es adecuado para los tiempos de reacción de vehículos convencionales. Mientras que, para los vehículos autónomos el tiempo de reacción es considerablemente menor. Por lo que su uso en la modelación de la dinámica del tráfico vehicular mixto requiere redefinir las reglas que lo componen. Además, el modelo LAI-E no considera en su definición la dinámica vehicular y características de los vehículos autónomos de anticipar las acciones y reducir la distancia de seguridad evitando las colisiones. Por lo que, es necesario redefinir las reglas de la dinámica vehicular cuando se simulen escenarios con tráfico compuesto por vehículos convencionales y autónomos. El reto es mantener la fidelidad y simplicidad del modelo.

5.4 Estado del arte: vehículos autónomos y su modelación.

La introducción de los vehículos automatizados en el tráfico vehicular es un problema imperante que está siendo debatido por científicos, políticos, militares y la sociedad en general [50], [51], [52], [53]. La opinión general es que el tráfico puramente automatizado, reduce la congestión, el consumo de combustible y los accidentes. Además, que se espera que reduzca los riesgos de accidentes. Particularmente, la situación en el tráfico en el que se mezclan vehículos automatizados y convencionales es de importancia actual. Sin embargo, como actualmente aún no se producen vehículos autónomos en alta demanda no existe mucha información sobre sus características. Por ello, actualmente se están desarrollando muchos modelos para ayudar a simular y analizar el tráfico mixto con vehículos autónomos y convencionales. Dado que las capacidades mecánicas y el desempeño de estos vehículos son distintos, estas diferencias entre los vehículos automatizados y los convencionales pueden describirse mejor si se reproducen en una simulación microscópica del tráfico. En este sentido, los modelos se pueden clasificar en dos categorías: modelos de seguimiento de vehículos (conocidos como car-following en inglés) y modelos basados en autómatas celulares (AC) como NaSch. Aunque ambos se enfocan en modelar la dinámica vehicular, los modelos que se enfocan en el seguimiento y la interacción de vehículos en una carretera o vía pública, sus agentes interactúan con el vehículo que les precede y ajustan su velocidad para que la diferencia de tiempo entre ellos se mantenga en el valor deseado, usando para ello ecuaciones continuas. En los modelos basados en autómatas celulares, el espacio y el tiempo están divididos en unidades discretas. En este estudio nos centramos principalmente en los modelos basados en autómatas celulares, con el objetivo de proponer un modelo con la intención de simular el tráfico vehicular mixto.

En el contexto del campo de la modelación del tráfico, se han realizado numerosos estudios sobre el impacto de la conducción autónoma en el flujo vehicular. Durante las primeras etapas de desarrollo, el término conducción autónoma se asoció en gran medida con los vehículos semiautomáticos que tienen una función de asistente de conducción conocida como ACC [54]. Fagnant y Kockelman utilizando un modelo basado en agentes para asignar vehículos en una región, indican que cada AV compartido (SAV) podría reemplazar alrededor de diez vehículos privados o domésticos, al considerar los beneficios potenciales de los vehículos autónomos en términos de seguridad vial, reducción de la congestión y cambios en los comportamientos de viaje [55]. Presentaron varios métodos de implementación junto con algunas recomendaciones de política. Gruel y Stanford analizaron los efectos a largo plazo de los vehículos autónomos utilizando un enfoque especulativo, los escenarios se basan en un modelo de dinámica de sistema establecido que representa las principales fuerzas involucradas en los sistemas de transporte [56]. En estos estudios, el impacto de los AV se abordó en gran medida utilizando enfoques analíticos. Sin embargo, se puede utilizar un modelo de flujo de tráfico para resolver este problema mediante un enfoque computacional mediante simulación, que puede proporcionar resultados más precisos. Ioannou y Chien

desarrollaron un sistema de control de cruceo inteligente autónomo. Evaluaron el rendimiento del sistema a través de una simulación por computadora y encontraron que el sistema desarrollado contribuye a un flujo de tráfico más rápido y fluido [57]. Arem y col. estudió el impacto de un ACC cooperativo en las características del flujo del tráfico y encontró que la estabilidad del flujo del tráfico se puede mejorar junto con un ligero aumento en la eficiencia del flujo [58]. Kesting y col. estudiaron una estrategia ACC para mejorar la estabilidad del tráfico y aumentar la capacidad dinámica de la carretera [59]. En la mayoría de los estudios anteriores sobre conducción autónoma, se analizaron los posibles efectos de la tecnología ACC, centrándose principalmente en el proceso de seguimiento del automóvil y se utilizaron modelos de un solo carril sin considerar los comportamientos de adelantamiento. En 2003, Bose y Ioannou [60] analizaron las densidades de flujo con vehículos convencionales y autónomos, y abordaron el tema de las perturbaciones en el flujo de tráfico mixto, específicamente las ondas de choque, mediante el uso de un modelo de seguimiento de vehículos y otro modelo que incluyó vehículos semiautomáticos. Davis [60] aplicó un modelo de seguimiento de vehículo para simular los fenómenos del tráfico con flujo mixto en una zona de confluencia utilizando una rampa, evaluó la estabilidad local del flujo de tráfico en presencia de los AV, y sugirió que los AV recibieran información interconectados entre sí, para aliviar la congestión de tráfico que se produce en una carretera reducida. Kim y Liu [61] presentaron el concepto de conducción autónoma cooperativa, que proporciona a los conductores la situación de tráfico que tienen por delante, permitiéndoles tomar mejores decisiones que favorezcan la eficiencia y la seguridad del flujo de tráfico. Por otra parte, Levin y Boyles [62] con el desarrollo de un modelo encontraron que los AV mejoran el patrón de tráfico en los enlaces e intersecciones, y el grado de mejora depende del factor de penetración de tales vehículos. Sin embargo, el modelo de Levin sólo tiene en cuenta el tiempo de reacción del conductor, sin considerar la interacción que se produce entre los vehículos convencionales y autónomos. Sharma [63], Van Lint y otros [64] utilizaron un modelo de flujo de tráfico mixto para recrear el comportamiento de los conductores y simular su impacto en las condiciones del tráfico e identificaron sus características, pero no lograron medir el efecto de las restricciones de los vehículos convencionales en los AV. Ngoduy [65] notó la significativa mejora en la capacidad del sistema de tráfico y el tiempo de viaje, cuando la proporción de AV en el flujo de tráfico mixto superaba el 30%.

En el caso de los modelos basados en AC [66], a la fecha son pocos los estudios enfocados a estudiar el tráfico de vehículos autónomos y menos aún los dedicados al tráfico vehicular mixto.

Jiang y Wu [67] fueron los primeros en proponer un modelo de un solo carril basados en AC que tuviera en cuenta los AV. El modelo de Jiang posee un paso de desaceleración aleatorio que refleja los cambios psicológicos del conductor, causando fluctuaciones en las velocidades de los AV. Inspirados por la regla de la distancia de seguridad de Gipps, Qiu et al [68] propusieron un modelo de AC para las AV basado en la distancia de seguridad. A través de la simulación, Yan-Yan et al en [69] llegaron a la conclusión de que el flujo de tráfico tradicional se hizo más

estable debido al incremento de su tasa de penetración. Liu et al [70] crearon un modelo de seguimiento de vehículos y demostraron que los vehículos conectados mejoran la estabilidad del flujo de tráfico. Muchos otros experimentos de simulación [71], [72], [73], [74], [75] comparten la opinión de que la incorporación de vehículos autónomos en las carreteras tiene un impacto significativo en el flujo y la velocidad del tráfico, mejorándolos notablemente, y el grado de mejora aumenta con la tasa de penetración de los AV. Recientemente, Vranken y Schreckenberg propusieron un modelo multicarril capaz de simular el tráfico heterogéneo, donde los vehículos humanos se mezclan con vehículos automatizados y conectados; el modelo reproduce varias observaciones empíricas [76]. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos realizados de simular AVs o ACCs en el contexto de modelos de autómatas celulares, el inconveniente de estos modelos es que utilizan una longitud de paso de tiempo de 1 seg, de acuerdo con la propuesta original del modelo NaSch; que desde luego no es adecuado para vehículos autónomos. Además, los agentes de estos modelos no tienen características de comportamiento diferentes según la situación. Este significa que, los agentes humanos no pueden seguir al agente líder con menos de la distancia de seguridad, algo que es necesario para que los tiempos de seguimiento de los coches sean realistas en el flujo libre, esto puede generar problemas en la interacción coche-robot en un flujo de tráfico mixto; ya que diferentes comportamientos de conducción tienen un fuerte impacto en la estabilidad del flujo de tráfico, por lo que es importante reproducirlos para analizar el impacto de los vehículos automatizados en el mejoramiento y manejo de las vías actuales. Aún no está claro cómo las diferencias entre los dos tipos de modelos influyen en los resultados de la simulación, por lo que su estudio usando modelos realistas es fundamental.

Por lo tanto, en esta tesis se presenta un nuevo modelo para el análisis del tráfico vehicular mixto, basado en autómatas celulares y desarrollado a partir del modelo LAI-E propuesto por Guzmán [47]. El modelo LAI-E se basa en el Movimiento Uniformemente Acelerado (MUA) con el fin de lograr una representación más fiel de la dinámica vehicular y minimizar el movimiento brusco presente en la mayoría de los modelos de autómatas celulares disponibles. Esta tesis, en el siguiente capítulo propone la consideración de algunas características de los AVs como un menor tiempo de reacción y distancias de seguridad reducidas a diferencia del modelo LAI-E. Y justamente, es lo que se enfoca la propuesta de esta tesis, que se presenta en el siguiente capítulo.

Capítulo 6 MODELO DE AC QUE CONSIDERA VEHÍCULOS AUTÓNOMOS Y CONVENCIONALES (LAI-EM)

En este capítulo se introduce un nuevo modelo para la dinámica vehicular en el tráfico vehicular mixto que incluye tanto vehículos autónomos como convencionales. Este modelo se basa en una extensión del enfoque LAI-E, que se describe previamente en la sección 5.3. De tal manera que, para los vehículos autónomos se definen distancias de seguridad reducidas en comparación con vehículos convencionales.

6.1. Consideraciones generales del modelo LAI-EM

Al igual que en el modelo LAI-E, el nuevo enfoque LAI-EM se basa en el cálculo de tres distancias de seguridad para asegurar una conducción segura. Estas distancias garantizan que el vehículo seguidor tenga la distancia adecuada con respecto a su vehículo precedente (el vehículo líder) para acelerar, mantener la velocidad o frenar sin riesgos. El modelo que en este trabajo de tesis se propone, que nombraremos en adelante LAI-EM, tiene como objetivo describir las capacidades reales de la interacción del tráfico vehicular mixto entre vehículos autónomos y no autónomos. Para ello, se toma en cuenta dos factores:

- 1) Los vehículos autónomos tienen un tiempo de reacción más corto en comparación con los vehículos convencionales.
- 2) Las distancias de seguridad que un vehículo autónomo requiere para tomar una acción son menores que la de un vehículo convencional como consecuencia de sus capacidades mecánicas y de su equipamiento, que le permite conocer casi instantáneamente la acción que un vehículo líder toma.

Por otra parte, los fabricantes de automóviles, con el fin de evaluar la resistencia y el comportamiento de un determinado vehículo durante una colisión, realizan pruebas de choque. Esto mismo se realiza con los vehículos autónomos, estudios realizados indican que choques a velocidades muy bajas no implican ningún daño ni para los conductores, ni para los vehículos; sin embargo, permiten reducir las distancias de seguridad entre el vehículo autónomo y su vehículo precedente para tomar una acción de conducción más conveniente. Con el objetivo de verificar cuál es el comportamiento del modelo propuesto considerando choques de los vehículos autónomos a velocidades seguras, se incluye lo que llamamos el factor de seguridad r en la dinámica y definición analítica del modelo. Así, cuando el factor r tiene un valor 0 sería un modelo libre de choques durante el proceso de frenado, como en el modelo LAI-E. No obstante, cuando el valor de r es menor que 0, en la definición del correspondiente tiempo de frenado del vehículo seguidor (que es fundamental para la definición de las distancias de seguridad) se considera que este deja de moverse cuando alcanza una velocidad igual a $-r$ m/s. De tal manera que, a medida que el valor de r se incrementa, la distancia de seguridad necesaria para acelerar, desacelerar y mantener la velocidad de forma segura disminuye.

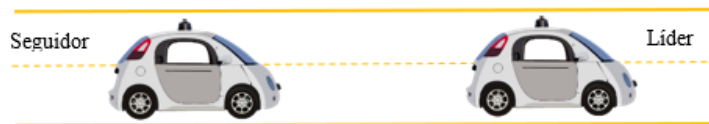
Además, el modelo LAI-EM mantiene el valor máximo que las capacidades de aceleración/desaceleración pueden alcanzar según la información operativa de los vehículos reales.

Por tanto, los factores críticos que se consideran para establecer el modelo LAI-EM y que afectan la definición de las distancias seguras de seguimiento son los siguientes:

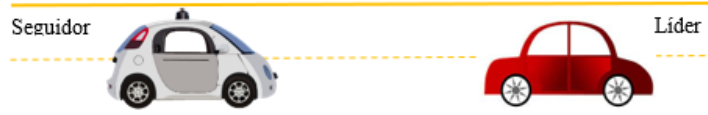
- a) Se considera un tráfico vehicular mixto con vehículos autónomos y convencionales.
- b) Debido a que los vehículos autónomos se adaptan de manera casi instantánea a los cambios en el ambiente, ya no es preciso tener en cuenta el tiempo de reacción en la determinación de las distancias seguras, tal como era requerido en el modelo LAI-E.
- c) Se introduce un factor de seguridad denotado como r , con el objetivo de reducir las distancias de seguridad y considerar choques a bajas velocidades para los vehículos autónomos.

Por otra parte, los escenarios que se pueden presentar en la carretera para el estudio del comportamiento de los vehículos autónomos son los mostrados en la Figura 7.

1. Líder: Vehículo Autónomo, Seguidor: Vehículo Autónomo



2. Líder: Vehículo Convencional, Seguidor: Vehículo Autónomo.



3. Líder: Vehículo Autónomo, Seguidor: Vehículo Convencional.



4. Líder: Vehículos Convencional, Seguidor: Vehículo Convencional.



Figura 7: Escenarios posibles cuando se considera tráfico vehicular mixto, para los vehículos líder y seguidor.

En los escenarios 3 y 4 se consideran las distancias de seguimiento seguro definidas en el modelo LAI-E, como se describe en la Sección 5.3, incluyendo sus propios casos de vehículos detenidos y en movimiento. Sin embargo, para los casos descritos en los escenarios 1 y 2 de la Figura 7, donde el vehículo seguidor es autónomo, es necesario redefinir las reglas que determinan las acciones que tomarán los vehículos.

En el caso de que el vehículo seguidor sea autónomo, se deben calcular las distancias de seguridad de manera específica (debido a los aditamentos con los que cuenta que le permiten detectar la acción del vehículo que le precede), la definición de las distancias de seguimiento seguro tienen en cuenta el hecho de que, tanto el vehículo líder como el seguidor (autónomo) podrán acelerar, mantener su velocidad o desacelerar en el intervalo de tiempo t , y luego en el siguiente intervalo de tiempo, comenzarán a desacelerar bruscamente hasta que se detengan; de forma que el vehículo seguidor siga evitando colisiones con el vehículo que le precede, aunque éste también frene bruscamente en cualquier paso de tiempo t . Con este proceso, las distancias de seguridad que requieren los vehículos autónomos son menores que la de los convencionales.

Además, siguiendo la lógica del modelo LAI-E, en el apartado siguiente se establecen las distancias seguras de seguimiento para los vehículos que operan de manera autónoma, correspondientes a los escenarios 1 y 2 de la Figura 7, la determinación de las distancias actualizadas involucra la evaluación de dos situaciones posibles en relación a las colisiones, con el propósito de fijar las distancias que garantizan un seguimiento seguro, tal como se establece en la sección 5.3: vehículo líder detenido y vehículo líder en movimiento. De tal manera que el modelo permite simular la dinámica de vehículos con diferentes características físicas y mecánicas, sin que se produzcan colisiones.

1.- Colisión con vehículo sin movimiento: Cuando el vehículo que va al frente se detiene, el vehículo que lo sigue choca contra él. Este escenario se puede presentar incluso cuando los vehículos tienen las mismas capacidades de acelerar/desacelerar.

2.- Colisión con vehículo en movimiento: Este tipo de colisión se produce cuando ninguno de los vehículos se detiene y ambos continúan en movimiento, lo que resulta en una colisión entre ambos vehículos. El escenario solo ocurre cuando los vehículos seguidor y líder poseen diferentes capacidades de aceleración/desaceleración. Es relevante señalar que el factor determinante no es el tipo de vehículo, sino la diversidad en sus características para acelerar y desacelerar.

6.2. Definición de dinámica de frenado

En la Tabla 1 se resumen las variables que se tienen en cuenta para definir la dinámica del modelo, siendo los subíndices l y f utilizados para hacer referencia al vehículo líder y seguidor, respectivamente.

Parámetro	Parámetro
a_{max_l} Maxima aceleración del vehiculo lider	a_{max_f} Maxima aceleración del vehiculo seguidor
x_{l_t} Posición de la defensa trasera del vehiculo lider en el tiempo t .	x_{f_t} Posición de la defensa trasera del vehiculo seguidor en el tiempo t .
v_{l_t} Velocidad inicial del vehiculo lider en el tiempo t .	v_{f_t} Velocidad inicial del vehiculo seguidor en el tiempo t .
a_{l_t} Aceleración normal del vehiculo lider al tiempo t .	a_{f_t} Aceleración normal del vehiculo seguidor al tiempo t .
t_{b_l} Tiempo de frenado para vehiculo lider.	t_{b_f} Tiempo de frenado para vehiculo seguidor.
$S(T)$ Espacio entre el seguidor y el lider medido al tiempo t .	l_f Longitud del vehiculo seguidor
	r Factor que determina la distancia de seguimiento seguro para el caso de vehiculos autonomos.

Tabla 1 Variables de la dinámica de frenado.

Con base en las definiciones de las ecuaciones (1), (2) y (3) del modelo LAI-E de la sección 5.3 se definen los tiempos de frenado para un vehículo seguidor que es de tipo autónomo y su respectivo vehículo líder.

Debido a que el vehículo seguidor es de tipo AV, es posible conozca la acción de su correspondiente vehículo líder, a diferencia del modelo LAI-E para vehículos convencionales. Por lo que, no se requiere proyectar el movimiento desde el tiempo $t+1$ hacia adelante; en su lugar, ello se puede llevar a cabo desde el tiempo t . Entonces, por (10), la posición del vehículo líder X_{l_t} al tiempo t está dada por lo siguiente:

$$X_{l_t} = X_{l_0} + V_{l_0} + a_{l_t}/2. \quad (10)$$

La expresión describe la ubicación del líder (sea subíndice l) en un momento específico t denotada por X_{l_t} , mientras que la variable a_{l_t} representa una de las tres opciones que puede elegir el líder en su primer movimiento en ese instante de tiempo t indicadas por $a_{l_t} \in \{a_l, 0, -a_l, -amax_l\}$.

Por otro lado, su velocidad v_{l_t} al tiempo $t = t + 1$ está dada por:

$$V_{l_t} = V_{l_0} + a_{l_t}. \quad (11)$$

donde V_{l_t} es la velocidad del líder al tiempo t .

Considerando el vehículo seguidor f , que tiene la opción de acelerar, desacelerar o mantener su velocidad en el momento t , su posición X_{f_t} en el tiempo t se determina por la expresión :

$$X_{f_t} = X_{f_0} + V_{f_0} + a_{f_t}/2. \quad (12)$$

La posición del vehículo seguidor en el tiempo t se representa por X_{f_t} , y la variable a_f indica una de las tres acciones que el seguidor puede realizar en el instante inicial t . Estas acciones se describen como $a_{f_t} \in \{a_f, 0, -a_f, -amax_f\}$.

La fórmula establece que la velocidad del vehículo seguidor v_f en el tiempo t se determina por:

$$V_{ft}=V_{f_0} + a_{ft}. \quad (13)$$

Donde v_f , es la velocidad del seguidor al tiempo t .

Si se considera que en el instante t el vehículo líder reduce su velocidad a su capacidad máxima permitida a_{max_l} y el vehículo seguidor desacelera al máximo a_{max_f} , por consiguiente las posiciones y velocidades de estos vehículos en cualquier momento posterior Δt se pueden calcular mediante las ecuaciones presentadas.

Líder:

$$X_{l(\Delta t)}=X_{lt} + V_{lt} * (\Delta t) - \frac{amax_l}{2} * (\Delta t)^2. \quad (14)$$

$$V_{l(\Delta t)}=V_{lt} - amax_l * (\Delta t). \quad (15)$$

Seguidor:

$$X_{f(\Delta t)}=X_{ft} + V_{ft} * (\Delta t) - \frac{amax_f}{2} * (\Delta t)^2. \quad (16)$$

$$V_{f(\Delta t)}=V_{ft} - amax_f * \Delta t. \quad (17)$$

Se definen como t_{b_l} y t_{b_f} los tiempos que tardan el líder y el seguidor en detenerse completamente, los cuales se emplean para determinar la posible colisión entre dos vehículos al describir su movimiento mediante el modelo de movimiento uniformemente acelerado (MUA).

El tiempo de frenado para el vehículo líder está determinado por:

$$t_{b_l} = \frac{V_{lt}}{amax_l} \quad (18)$$

El tiempo de frenado para el vehículo seguidor se calcula con base en la siguiente expresión:

$$t_{b_f} = \frac{V_{ft}+r}{amax_f} \quad (19)$$

Este modelo introduce el parámetro $r \in \{0, -1, -2\}$, como factor de seguridad, es decir, un aspecto que determina la distancia segura que un vehículo debe mantener

al seguir a otro, es la velocidad a la que se desplaza, permitiendo alcances con velocidades relativas con velocidad de r .

El modelo original LAI-E, se recupera cuando se eliminan las reglas de los vehículos autónomos. No obstante, el modelo que se propone en este trabajo, permite la velocidad original de -1 o -2 m/s; lo que implica que para el caso de los vehículos autónomos se permitan alcances con el vehículo predecesor con velocidad relativa r , cuyo valor máximo es de 2 m/s [77] siendo el límite para evitar accidentes fatales.

La inclusión de este factor reduce la distancia segura que se debe mantener con respecto al vehículo precedente, a fin de evitar colisiones, aumentando así el flujo máximo. Cabe mencionar que sólo vehículos autónomos pueden considerar valores de r diferentes de 0 .

A partir de lo expuesto anteriormente, se procede a detallar el proceso para calcular las distancias seguras de seguimiento actualizadas.

6.3. Distancia de vehículo líder detenido [47]

La distancia de frenado, representada como \widetilde{X}_n , se define como la distancia que un vehículo recorre antes de detenerse completamente. Se puede calcular su valor tanto para el vehículo líder como para el seguidor al sustituir los tiempos de frenado t_{b_l} y t_{b_f} en las ecuaciones (5) y (7), respectivamente:

$$\widetilde{X}_l = X_{lt} + \frac{V_{lt}^2}{2a_{max_l}} \quad (20)$$

$$\widetilde{X}_f = X_{ft} + \frac{(v_{ft} + r)^2}{2a_{max_f}} \quad (21)$$

Considerando que l_f es la longitud del vehículo seguidor, la exigencia para evitar colisiones del seguidor cuando el líder está detenido es la siguiente:

$$\widetilde{X}_l - l_f \geq \widetilde{X}_f. \quad (22)$$

Al sustituir \widetilde{X}_l , \widetilde{X}_f , $X_{l(\Delta t)}$, $V_{l(\Delta t)}$, $X_{f(\Delta t)}$ y $V_{f(\Delta t)}$ en la ecuación (22), se logró obtener:

$$X_{l_0} + V_{l_0} + \frac{a_{lt}}{2} + \frac{(V_{lt})^2}{2a_{max_l}} - l_f \geq X_{f_0} + V_{f_0} + \frac{a_{ft}}{2} + \frac{(v_{ft} + r)^2}{2a_{max_f}} \quad (23)$$

$$X_{l_0} - X_{f_0} - l_f \geq V_{f_0} - V_{l_0} + \frac{a_{ft}}{2} - \frac{a_{lt}}{2} + \frac{(v_{ft} + r)^2}{2a_{max_f}} - \frac{(V_{lt})^2}{2a_{max_l}} \quad (24)$$

$$X_{l_0} - X_{f_0} - l_f \geq (V_{f_0} - V_{l_0}) + \left(\frac{a_{ft} - a_{lt}}{2}\right) + \frac{(v_{ft} + r)^2}{2a_{max_f}} - \frac{(V_{lt})^2}{2a_{max_l}} \quad (25)$$

$$D_{det} = (V_{f_0} - V_{l_0}) + \left(\frac{a_{ft}-a_{lt}}{2}\right) + \frac{(v_{ft}+r)^2}{2amax_f} - \frac{(V_{lt})^2}{2amax_l} + l_f \quad (26)$$

Bajo dicha circunstancia, se pueden establecer tres distancias de seguridad diferentes dependiendo de si el vehículo seguidor acelera D_{acc}^{det} , mantiene su velocidad constante D_{keep}^{det} , o disminuye su velocidad D_{decc}^{det} hasta el siguiente intervalo de tiempo, todo esto con el propósito de evitar una posible colisión o aproximación al vehículo líder en caso de que éste se haya detenido. Así, estas distancias mínimas establecerán la acción que cada vehículo deberá tomar, y se calcularán de la siguiente forma:

$$D_{acc}^{det} = (V_{f_0} - V_{l_0}) + \left(\frac{a_{ft}-a_{lt}}{2}\right) + \frac{(v_{ft}+r)^2}{2amax_f} - \frac{(V_{lt})^2}{2amax_l} + l_f \quad (27)$$

$$D_{keep}^{det} = (V_{f_0} - V_{l_0}) + \left(\frac{-a_{lt}}{2}\right) + \frac{(v_{ft}+r)^2}{2amax_f} - \frac{(V_{lt})^2}{2amax_l} + l_f \quad (28)$$

$$D_{decc}^{det} = (V_{f_0} - V_{l_0}) + \left(\frac{-a_{ft}-a_{lt}}{2}\right) + \frac{(v_{ft}+r)^2}{2amax_f} - \frac{(V_{lt})^2}{2amax_l} + l_f \quad (29)$$

6.4. Distancia de vehículos en movimiento [47]

Este escenario se presenta cuando se toman en cuenta vehículos con distintas características de frenado. En tal caso, es probable que, a pesar de que la distancia final entre ambos vehículos durante su proceso de frenado cumpla con los requisitos mencionados en la sección anterior, una colisión se produzca si la distancia entre ambos llega a ser negativa antes de que el vehículo líder se detenga por completo. Esto puede ocasionar que la parte frontal del vehículo seguidor impacte contra la parte trasera del vehículo líder.

En caso de que los vehículos estén en movimiento, se debe garantizar el cumplimiento de las siguientes condiciones para cada instante de tiempo $t + T$:

$$0 < T > t_{b_l}.$$

$$0 < T > t_{b_f}.$$

Denominemos $S(T)$ al espacio existente entre el vehículo seguidor y el líder, medido en el momento $t + T$, de modo que:

$$S(T) = X_{l_{t+T}} - X_{f_{t+T}} - l_f. \quad (30)$$

Si se reemplazan los valores apropiados x_l y x_f en la ecuación (30), por lo tanto:

$$S(T) = X_{l(t+1)} + V_{l(t)} * T - \frac{amax_l}{2} * T^2 - \left(X_{f(t+1)} + (V_{f(t)} - r) * T - \frac{amax_f}{2} * T^2 \right) - l_f \quad (31)$$

$$S(T) = (X_{l(t+1)} - X_{f(t)} - l_f) + (V_{l(t+1)} - (V_{f(t)} - r)) * T - \frac{1}{2}(amax_l - amax_f) * T^2 \quad (32)$$

El criterio para establecer la distancia mínima entre dos vehículos se basa en la aplicación de la primera y segunda derivada sobre $S(T)$, utilizando las ecuaciones (14-17).

$$S(T)' = (V_{l(t+1)} - (V_{f(t)} - r)) - (amax_l - amax_f) * T. \quad (33)$$

$$0 = (V_{l(t+1)} - (V_{f(t)} - r)) - (amax_l - amax_f) * T. \quad (34)$$

$$T = \frac{-(V_{l(t+1)} - (V_{f(t)} - r))}{-(amax_l - amax_f)} \quad (35)$$

$$T = \frac{(V_{l(t+1)} - (V_{f(t)} - r))}{(amax_l - amax_f)} \quad (36)$$

Sea T un valor crítico para $S(T)$, las siguientes ecuaciones deben ser satisfechas para que T sea considerado un mínimo:

$$amax_l - amax_f < 0 \quad (37)$$

$$(V_{l(t+1)} - (V_{f(t)} - r)) < 0. \quad (38)$$

Las ecuaciones deben cumplirse porque la segunda derivada debe ser positiva para ser un mínimo, y T debe conducir a un tiempo positivo en el modelo. Por lo tanto, suponiendo que $S(T) > 0$, la distancia de seguimiento segura se puede determinar de la siguiente manera:

$$S(T) = (X_{l(t+1)} - X_{f(t)} - l_f) + (V_{l(t+1)} - (V_{f(t)} - r)) * \frac{(V_{l(t+1)} - (V_{f(t)} - r))}{(amax_l - amax_f)} - \frac{1}{2}(amax_l - amax_f) * \left(\frac{(V_{l(t+1)} - (V_{f(t)} - r))}{(amax_l - amax_f)}\right)^2 \quad (39)$$

$$S(T) = (X_{l(t+1)} - X_{f(t)} - l_f) + \frac{(V_{l(t+1)} - (V_{f(t)} - r))^2}{(amax_l - amax_f)} - * \frac{(V_{l(t+1)} - (V_{f(t)} - r))^2}{2(amax_l - amax_f)} \quad (40)$$

$$S(T) = (X_{l(t+1)} - X_{f(t)} - l_f) + \frac{(V_{l(t+1)} - (V_{f(t)} - r))^2}{2(amax_l - amax_f)} \quad (41)$$

Para obtener los términos necesarios, es requerido expresar los valores en función del tiempo t , lo que resulta en:

$$S(T) = (X_{lt} + V_{lt} + a_{lt}/2 - (X_{ft} + V_{ft} + a_{ft}/2) - l_f) + \frac{(V_{l(t+1)} - (V_{f(t)} - r))^2}{2(amax_l - amax_f)} \quad (42)$$

$$S(T) = (X_{lt} - X_{ft} - l_f) + (V_{lt} - V_{ft}) + (a_{lt}/2 - a_{ft}/2) + \frac{(V_{l(t+1)} - (V_{f(t)} - r))^2}{2(amax_l - amax_f)} \quad (43)$$

$$-(V_{lt} - V_{ft}) - (a_{lt}/2 - a_{ft}/2) - \frac{(V_{l(t+1)} - (V_{f(t)} - r))^2}{2(a_{max_l} - a_{max_f})} < X_{lt} - X_{ft} - l_f. \quad (44)$$

Entonces, la distancia de seguridad mínima, D_{mov} , que debe existir entre dos vehículos cuando el vehículo seguidor es de tipo autónomo, para evitar colisiones en movimiento durante el proceso de frenado de emergencia puede tomar los valores definidos en las ecuaciones (45)-(47).

$$D_{acc}^{mov} = -(V_{lt} - V_{ft}) - (a_{lt}/2 - a_{ft}/2) - \frac{(V_{l(t+1)} - (V_{f(t)} - r))^2}{2(a_{max_l} - a_{max_f})} + l_f. \quad (45)$$

$$D_{keep}^{mov} = -(V_{lt} - V_{ft}) - (a_{lt}/2) - \frac{(V_{l(t+1)} - (V_{f(t)} - r))^2}{2(a_{max_l} - a_{max_f})} + l_f. \quad (46)$$

$$D_{dec}^{mov} = -(V_{lt} - V_{ft}) - (a_{lt}/2 - a_{ft}/2) - \frac{(V_{l(t+1)} - (V_{f(t)} - r))^2}{2(a_{max_l} - a_{max_f})} + l_f. \quad (47)$$

Es importante mencionar que, las condiciones para que una colisión en movimiento ocurra, se satisfacen para casos muy particulares, cuando se consideran vehículos con condiciones de aceleración diferentes. Por consiguiente, el modelo incorpora criterios de selección para elegir entre ambos casos.

6.5. Reglas de actualización del modelo LAI-EM

Las reglas que se presentan son las utilizadas en el modelo LAI [45] y LAI-E [43], lo que diferencia al modelo LAI-EM son sus distancias de seguridad.

El modelo considera dos clases de vehículos: los autónomos (A) y los convencionales (C), los cuales poseen velocidades máximas, tiempos de reacción y características de aceleración y desaceleraciones distintas.

Después del análisis realizado en la sección anterior se obtuvieron las distancias de seguridad. Los pasos representados conservan la lógica del modelo LAI-E.

El parámetro R_s en el paso S3b se ajusta al ruido de los vehículos autónomos ya que debe ser el valor más bajo posible.

Suponiendo que l es el vehículo líder y f es el seguidor. En lo siguiente, se describen los pasos modificados del modelo LAI-EM, con base en el análisis para las distancias de seguimiento seguro de los vehículos autónomos y las del modelo LAI-E que se presentaron en la sección previa. El paso S2 se ha modificado porque la aceleración retardada se debe a condiciones mecánicas en las que los carros no pueden acelerar bruscamente a bajas velocidades.

El Paso S1 implica fijar el criterio D_{det} y D_{mov} según lo establecido en secciones previas. Si \tilde{T} , t_{b_l} y t_{b_f} son los tiempos de frenado del vehículo, el tiempo seguro

de frenado del líder y el tiempo seguro de frenado del seguidor, respectivamente, se cumple lo siguiente:

(i) Si $\tilde{T} < t_{b_l}$ y $\tilde{T} < t_{b_f}$ entonces,

$$D_{acc_f} = D_{mov}^{acc}$$

$$D_{keep_f} = D_{mov}^{keep}$$

$$D_{decc_f} = D_{mov}^{decc}$$

(ii) De otra manera

$$D_{acc_f} = D_{det}^{acc}$$

$$D_{keep_f} = D_{det}^{keep}$$

$$D_{decc_f} = D_{det}^{decc}$$

Paso S2: Decisión. Sea $a_{f_{t+1}}$ la magnitud en celdas con la que un vehículo acelerará o desacelerará en el siguiente paso de tiempo, en condiciones normales de tráfico. Los vehículos a lo largo de la vía actualizan su estado, de forma síncrona, de acuerdo en las siguientes reglas:

S2a: Aceleración. Si $d_t \in [d_{acc_f}, +\infty)$ la nueva aceleración se define:

$$a_{f_{t+1}} = \begin{cases} a, & \text{si vehículo es autónomo} \\ a_{f_{t+1}} & \text{en LAI - EM, si vehículo es convencional} \end{cases}$$

La variable a se refiere a la aceleración calculada, y por defecto se asigna un valor de $a = a_{n_t}$.

S2b: Desaceleración aleatoria. En caso de que $d_t \in [d_{keep_f}, d_{acc_f})$ o ($v_f = v_{max}$), la probabilidad de que la aceleración del vehículo f disminuya es de R_s

$$a_{f_{t+1}} = \begin{cases} -a_n & \text{si aleatorio } () \leq R_s \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

S2c: Desaceleración. Si $d_t \in [d_{decc_f}, d_{keep_f})$, el vehículo f desacelera en a_n .

$$a_{f_{t+1}} = -a_n$$

S2d: Desaceleración de emergencia. En caso de que $d_t < d_{keep_f}$, la aceleración máxima del vehículo f se reduce en a_{max} .

$$a_{f_{t+1}} = -a_{max}$$

Donde $-a_{max}$ se refiere a la mayor capacidad que tiene el vehículo f para desacelerar en un determinado lapso de tiempo.

Paso S3: La velocidad se actualizará en base a la nueva aceleración calculada.

$$v_{f_{t+1}} = \min(\max(0, v_{f_t} + a_{f_{t+1}}), v_{max})$$

Paso S4: El cuarto paso (S4) representa el movimiento uniformemente acelerado (MUA) de la siguiente manera:

(i) Si $(a_{f_{t+1}} \geq 0)$

$$x_{f_{t+1}} = x_{f_t} + v_{f_t} + \frac{1}{2} a_{f_{t+1}}.$$

(ii) De otro modo,

$$x_{f_{t+1}} = x_{f_t} + v_{f_t} t_m + \frac{1}{2} a_{f_{t+1}} t_m^2.$$

Donde el requisito (ii) t_m indica el momento en que el vehículo seguidor se detiene, $t_m = \min(1, \text{abs}(\frac{v_{f_t+r}}{a_{f_{t+1}}}))$ y $a_{f_{t+1}} \in \{-a_n, -a_{max}\}$

x_{f_t} y v_{f_t} representan la posición y velocidad del vehículo seguidor f en el momento t .

Tenga en cuenta que la restricción (ii) del cuarto paso (S4) se debe al uso de aritmética entera por parte del modelo, lo que significa que, para velocidades bajas en el movimiento, se pueden producir movimientos en dirección opuesta a la permitida.

Si se elige el tamaño de celda adecuado, se pueden realizar todos los cálculos necesarios para determinar las distancias de seguimiento seguras, como en el modelo LAI-E.

Una vez realizados estos cálculos, se pueden elaborar tablas estáticas con las distancias necesarias para que los vehículos aceleren, mantengan su velocidad y disminuyan su velocidad de manera segura, teniendo en cuenta las diferentes combinaciones de vehículos líderes y seguidores.

Por otro lado, dentro del tráfico vehicular real, muchas carreteras tienen más de un carril. Considerar el multicarril es importante, por lo cual, en el siguiente capítulo, se definen reglas para la dinámica de cambio de carril aplicable al modelo LAI-EM.

Capítulo 7 EXTENSIÓN MULTICARRIL DEL MODELO LAI-EM

En el capítulo previo se presentó un modelo basado en AC para la simulación del flujo vehicular mixto, compuesto de vehículos autónomos y convencionales, en un solo carril. Aunque el modelo es adecuado, en la realidad la mayoría de las vías se componen de varios carriles, por lo que la incorporación de los vehículos autónomos a las mismas y su comportamiento debe considerarse. Por lo tanto, en este capítulo se introduce una extensión del modelo LAI-EM para la consideración del flujo vehicular mixto en varios carriles. Para este propósito, un conjunto de reglas de cambio de carril se incorpora al modelo, las cuales toman en cuenta la distancia de seguimiento seguro que se definieron para el modelo LAI-EM del flujo mixto en un solo carril, tanto para los vehículos autónomos como los convencionales.

En este trabajo, considerando que en México los cambios de carril son asimétricos, es decir, hay un carril que se usa para rebasar y uno para baja velocidad, se definen reglas de cambio de carril diferentes para cambiarse de un carril derecho a uno izquierdo y viceversa. Además, en ambos casos se considera un criterio incentivo, que toma en cuenta lo que motiva a un conductor a cambiarse de carril; y un criterio de seguridad, que garantiza que el cambio de carril es seguro y no genera incidentes en el carril destino. Para ello, y con la finalidad de continuar en la línea de reproducir un cambio de carril fiel a las características mecánicas de los vehículos con base en su tipo (autónomo o convencional), en la definición de las reglas de cambio de carril se incorporan las distancias de seguridad definidas en el capítulo previo tanto para los vehículos autónomos, como para los convencionales. De esta manera, se mantiene el objetivo del modelo LAI-E acorde con el comportamiento y características mecánicas de los dos tipos de vehículos que se consideran y el de los conductores desde un punto de vista microscópico.

7.1. Descripción de extensión del modelo multicarril (LAI-EM)

El modelo que aquí se presenta es para simular la dinámica del tráfico vehicular mixto de vehículos convencionales y autónomos en dos carriles. Sin embargo, el modelo funciona de manera semejante para más carriles.

Así, se introduce un conjunto de reglas de cambio de carril al modelo LAI-EM, que incorporan las distancias de seguimiento seguro en su definición. De tal manera que el conjunto de reglas del modelo multicarril mixto se compone de dos pasos:

- 1) Primero se realizan los cambios de carril, es decir, solo movimientos transversales de los vehículos.
- 2) Una vez realizados los cambios de carril, la dinámica de cada uno de los vehículos en un carril, se simula con base en el modelo LAI-EM para un solo carril; con lo que se actualiza la velocidad y posición de cada uno de los vehículos.

7.1.1 Reglas de cambio de carril [47]

Las reglas de cambio de carril se mantienen de la misma manera que en el Modelo LAI-E [45], lo que cambia son las velocidades de seguridad empleadas.

Sean f y l que denotan a un vehículo seguidor y un líder, respectivamente. El vehículo f cambiará de carril con probabilidad P_{change} , tomando en cuenta las distancias de seguimiento seguro con respecto a su vehículo líder en su carril actual, su vehículo seguidor y líder en el carril objetivo; así como los espaciamientos respectivos d_t , d_t^0 y d_b^0 , como se muestran en la Figura 8.

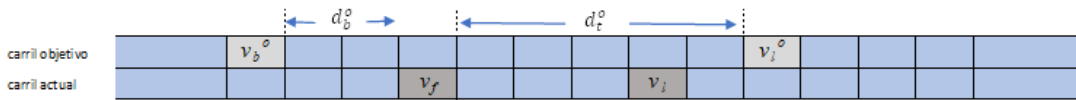


Figura 8: Esquema de cambio de carril y sus parámetros.

Cambio de carril hacia la izquierda

Criterio incentivo

$$(cii1) \text{ Si } \left[\left(D_{keep}(v_f, v_l) \leq d_t < D_{acc}(v_f, v_l) \right) \right] \text{ y } \left[\left(d_t^0 \geq D_{acc}(v_f, v_l^0) \right) \text{ y } (v_f < v_{max}) \right].$$

ó

$$(cii2) \text{ Si } \left[\left(d_t < D_{keep}(v_f, v_l) \right) \right] \text{ y } \left(d_t^0 \geq D_{keep}(v_f, v_l^0) \right).$$

Criterio de seguridad

$$(cs) \text{ Si } d_b^0 \geq D_{decc}(v_f^0, v_f).$$

Cambio de carril hacia la derecha

Criterio incentivo

$$(cid1) \text{ Si } \left[\left(d_t \geq D_{keep}(v_f, v_l) \right) \right] \text{ y } \left[\left(d_t^0 \geq D_{keep}(v_f, v_l^0) \right) \right].$$

Criterio de seguridad

$$(cs) \text{ Si } d_b^0 \geq D_{decc}(v_f^0, v_f).$$

Donde v_f y d_t denotan la velocidad del vehículo seguidor que se quiere cambiar de carril y el espaciamiento con su vehículo líder, respectivamente.

Además, v_l^o y d_l^o , denotan la velocidad del vehículo líder en el carril objetivo y el espaciamiento al mismo desde el vehículo seguidor f .

v_b^o y d_b^o , denotan la velocidad del vehículo sucesor del vehículo f en el carril objetivo y el espaciamiento entre ambos, respectivamente. En la Figura 8 se resumen los parámetros.

La función de la probabilidad de cambio de carril, p_{change} , tiene dos propósitos principales. En primer lugar, refleja el hecho de que los conductores no siempre cambian de carril, incluso si tienen la opción de hacerlo. En segundo lugar, esta función ayuda a controlar el número de cambios de carril que ocurren debido a la discreción del tiempo en el modelo propuesto.

De esta manera, al introducir las distancias de seguridad definidas para el modelo LAI-E en las reglas de cambio de carril, se busca un modelo más realista pero que a la vez reproduzca fielmente el desempeño del tráfico multicarril real.

En ambas reglas se define un criterio incentivo y uno de seguridad. Particularmente, el criterio incentivo para el cambio de carril izquierdo toma en cuenta los siguientes aspectos:

- 1) Un vehículo o conductor deseará cambiar de carril si no ha alcanzado su velocidad máxima.
- 2) En el carril actual no es posible acelerar, pero en el carril objetivo sí.
- 3) En el carril actual las condiciones implican que el vehículo seguidor desaceleraría, pero podría al menos mantener su velocidad en el carril objetivo.

Por otra parte, un vehículo podrá regresar al carril derecho, siempre que se garantice que puede mantener su velocidad; ello debido a que, en la realidad, un conductor no retorna al carril derecho si percibe que sus condiciones empeorarán.

En los párrafos siguientes se detallan los resultados obtenidos al evaluar el modelo LAI-EM de un carril y de varios carriles, que fue propuesto previamente.

Capítulo 8 RESULTADOS

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos tras simular el modelo propuesto, tanto para un circuito de un carril como para un circuito multicarril. Se incluyen consideraciones en las fronteras y resultados bajo diferentes escenarios.

8.1. Consideraciones de la frontera

Los resultados mostrados en este trabajo, se realizaron considerando una frontera con topología de anillo. Aunque en la realidad, las vías no son circuitos cerrados, esta topología es adecuada cuando se requiere estudiar el comportamiento del tráfico vehicular bajo un valor específico de densidad vehicular en ingeniería de tráfico vehicular.

Particularmente, para el modelo propuesto en este trabajo, la actualización de las posiciones y velocidades de los vehículos autónomos presentes en el circuito en un instante de tiempo, se calculan tomando en cuenta los valores actuales de velocidad y aceleración del vehículo líder para el cálculo de las distancias de seguridad del propio vehículo que determinan la acción que un vehículo tomará. De esta manera, con la consideración de fronteras cerradas y la dirección en la que se mueven los vehículos de izquierda a derecha, dicho proceso de actualización se inicia por el vehículo ubicado más adelante en el circuito (vehículo en la frontera derecha, ver Figura 9). Sin embargo, el vehículo de más adelante en la frontera derecha requiere para calcular su distancia de seguridad las distancias y velocidades relativas entre éste y el vehículo más a la izquierda en el circuito (que es su vehículo líder), que aún no ha actualizado su acción a tomar y podría llevar a colisiones en caso de que desacelere. Para evitar ello, es necesario solicitar al vehículo de hasta adelante que use una distancia artificialmente mayor con el primer vehículo que se encuentra en el anillo.

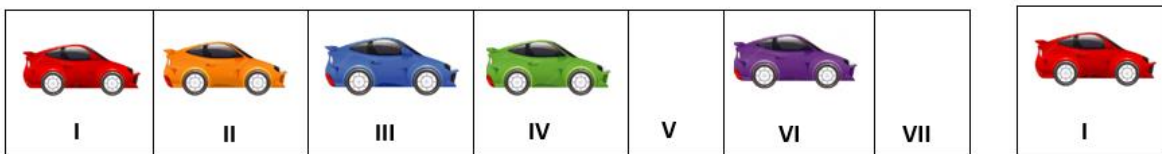


Figura 9: Representación de los vehículos en las fronteras.

8.2. Resultados en un carril

Como inicio del estudio, se examinó el rendimiento del modelo LAI-EM para evaluar cómo se comporta el tráfico vehicular cuando se incluyen vehículos autónomos en comparación con los vehículos convencionales. Los resultados obtenidos de la simulación que se muestran se llevaron a cabo considerando un circuito de 20 km y una longitud de celda $\Delta x = 0.125m$, es decir 160,000 celdas; este valor de celda se estableció con la finalidad de poder tomar en cuenta una resolución de velocidad muy pequeña que resulta importante para el desempeño de los vehículos autónomos. Además, sólo se consideran vehículos de la misma longitud $l =$

40 celdas (5m), independientemente de su tipo; aunque el modelo funciona para cualquier tipo de longitud (incluso con vehículos de diferentes longitudes). La velocidad máxima, v_{max} , para ambos tipos de vehículos, convencionales y autónomos, se estableció en $256 \frac{celdas}{s} \left(115.2 \frac{km}{h}\right)$. La aceleración normal y máxima que un vehículo puede tomar (no se hace distinción entre vehículos autónomos y convencionales, su dinámica es la que los distingue) se estable en $a_n = 32 \frac{celdas}{s^2} = \left(4 \frac{m}{s^2}\right)$ y aceleración máxima $a_{max} = 64 \frac{celdas}{s^2} = \left(8 \frac{m}{s^2}\right)$, respectivamente. El paso de tiempo se tomó a 1s, por lo que cada transición del sistema es de $t \rightarrow t + 1$; sin embargo, es importante enfatizar que, debido a las características de los AVs, si este es un vehículo seguidor, ya no es necesario considerar un tiempo de reacción de 1 segundo como los vehículos convencionales, por lo que al tiempo t ambos vehículos pueden realizar las mismas operaciones con él objetivo de conocer que aceleración posee el vehículo líder. Por lo que no es necesario reducir el tiempo t para los vehículos autónomos. El ruido $R_s = 0.01$. Los valores de las variables y parámetros se resumen en la Tabla 2.

Se realizaron simulaciones para 100 valores diferentes de densidad entre $2 \frac{veh}{km}$ y $200 \frac{veh}{km}$, con incrementos $2 \frac{veh}{km}$. Para cada valor de densidad, se considera un estado inicial en el que cada vehículo se ubica en posiciones aleatorias totalmente en reposo, es decir, con velocidad y aceleración cero. Cada simulación se ejecutó 70,000 pasos de tiempo, de los cuales se descartaron los primeros 66,400 pasos de tiempo (estado transitorio), con el objetivo que el modelo estuviera en un estado estable. Entonces, los resultados que se muestran son resultados de los siguientes 3,600 intervalos de tiempo. Además, a cada valor de densidad considerado, se realizaron 20 simulaciones con las mismas condiciones iniciales que se promedian para mostrar los resultados finales.

Parámetro	Valor
Δx	0.125 m
L	20 km=160,000 celdas
l	5m=40 celdas.
v_{max}	115.2 km/h= 256 celdas/s.
a_n	$32 \frac{celdas}{s^2} = \left(4 \frac{m}{s^2}\right)$
a_{max}	$64 \frac{celdas}{s^2} = \left(8 \frac{m}{s^2}\right)$,
R_s	0.01

Tabla 2 Valores de los parámetros usados para las simulaciones de un carril.

8.2.1. Resultados con factor de seguridad $r=0$ con vehículos homogéneos.

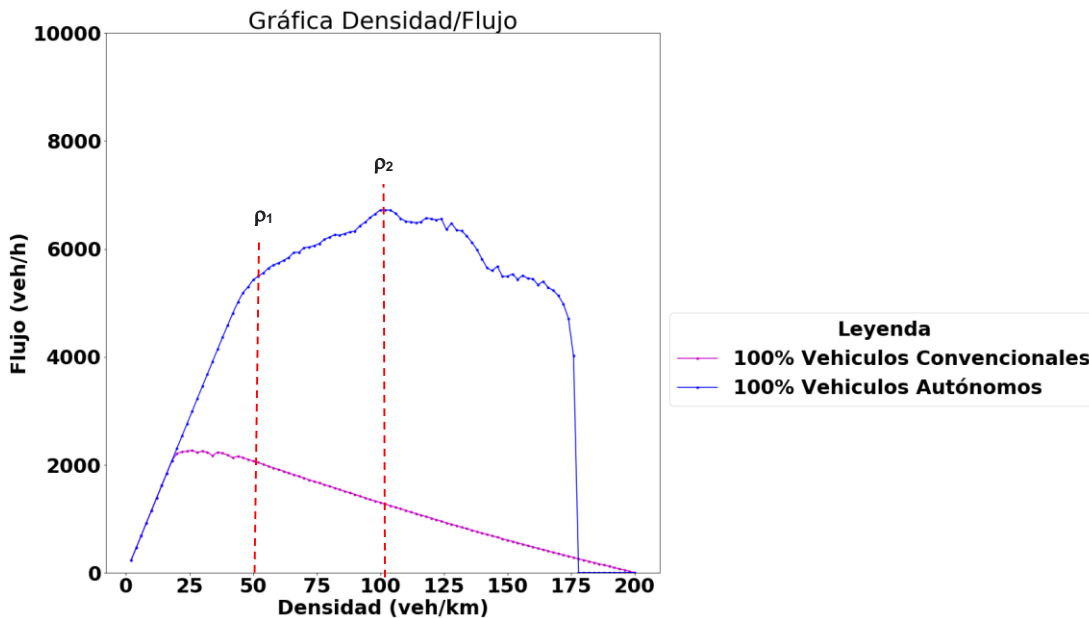


Figura 10: Diagrama fundamental flujo-densidad. De color azul se muestra el diagrama considerando sólo vehículos autónomos; mientras que de color magenta resulta de considerar sólo vehículos convencionales. Se considera en ambos casos un factor de seguridad $r=0$.

Como punto inicial de las investigaciones, se realizó un análisis del diagrama fundamental, cuando se consideran 100% de vehículos autónomos o convencionales cuando el factor de seguridad r es igual a cero, la Fig. 10 presenta los resultados obtenidos. Tal como se puede apreciar de éste diagrama, el flujo máximo (pendiente positiva) que se logra al considerar vehículos autónomos (6704.3 veh/hr), se incrementa ampliamente en relación con el que se alcanza al considerar sólo vehículos convencionales (2265.3 veh/hr). Además, la densidad crítica en la cual se logra el flujo máximo también se incrementa de 25 veh/km a 56 veh/km. Este desempeño es debido a que la consideración de la acción que tomará el vehículo líder (precedente) en la especificación de las distancias de seguridad, permite que el espacio que se requiere para acelerar, mantener o desacelerar sea menor (incluso igual a cero siempre que un vehículo seguidor y su líder realicen la misma acción) que el de los vehículos convencionales, lo que conlleva a que los vehículos puedan seguir moviéndose a velocidad cercana a la máxima en densidades mayores. Éste es justo uno de los objetivos de los vehículos autónomos: incrementar el flujo vehicular y permitir que más vehículos circulen en una vía bajo buenas condiciones de tráfico. Además, como puede observarse en la Figura 11, correspondiente al diagrama velocidad-densidad, una vez que el flujo máximo se ha alcanzado, el decaimiento de la velocidad promedio es más gradual cuando se consideran vehículos autónomos, debido a la formación de pelotones de vehículos con velocidades semejantes diferentes de cero, pero más bajas que la velocidad de flujo libre; hasta que ya no es posible que estos estados persistan y hay un cambio brusco de la velocidad a cero aproximadamente en una densidad de 175 veh/km, quizás ello se debe a la aritmética discreta del modelo y la resolución de tiempo y espacio considerados en las simulaciones.

La notable variación en los resultados se debe principalmente a las características únicas de los vehículos autónomos que se consideraron, como su capacidad para detectar la aceleración y velocidad del vehículo delantero es un factor clave.

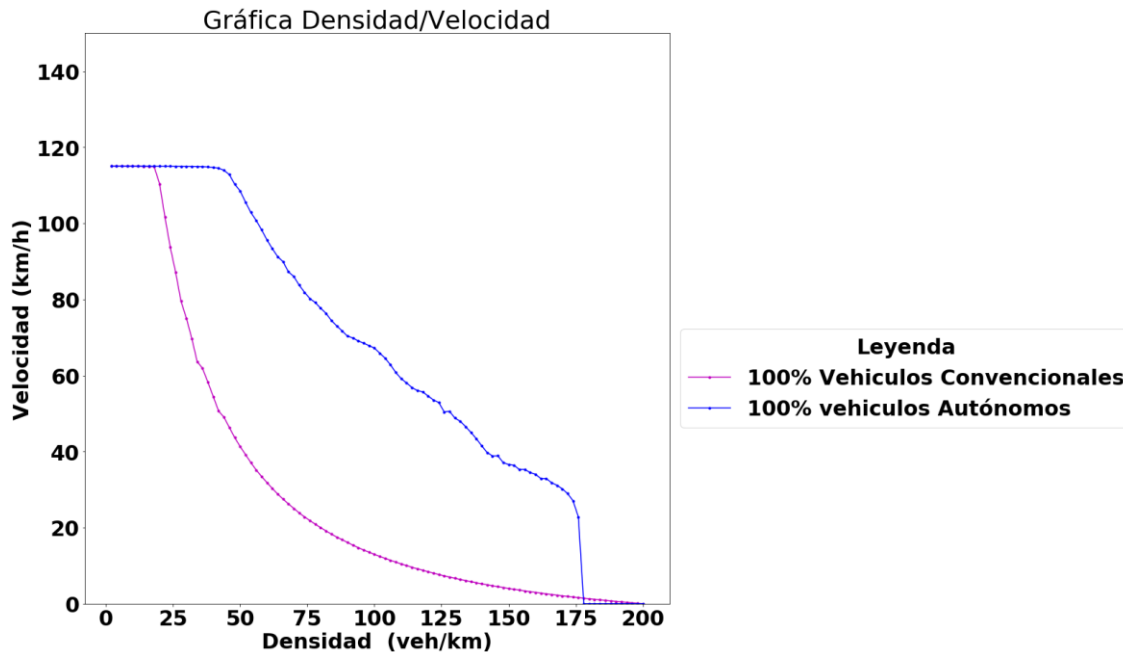


Figura 11: Diagrama fundamental, velocidad vs densidad. El diagrama de color azul: resulta de considerar sólo vehículos autónomos; el diagrama de color magenta: resulta de considerar sólo vehículos convencionales. El factor de seguridad es $r=0$.

Con la finalidad de profundizar en el análisis del comportamiento del flujo para los vehículos autónomos, se realizó un análisis del mismo con base en los diagramas espacio tiempo y las distribuciones de velocidad (porcentaje de vehículos en una velocidad particular) de los vehículos. Así, se seleccionaron 4 valores de densidad específicos 20, 60, 140 y 160 veh/km; cuyos comportamientos se muestran en las Figuras 12 a 15, respectivamente. Es importante mencionar que, en los diagramas de espacio tiempo, los puntos en cada columna vertical, representan la ubicación actual e inmediata de cada vehículo desplazándose en dirección hacia la derecha y cada columna representa el estado de los vehículos en tiempos sucesivos; cada color indica la velocidad a la que el vehículo se mueve. Como puede observarse de la Figura 12, cuando la densidad es muy baja, la mayoría de los vehículos se mueven con velocidades muy cercanas a la velocidad de flujo libre v_{max} y no hay estancamiento, por lo que las trayectorias de los vehículos siguen la dirección del flujo. Ello indica que el flujo es libre.

Por otra parte, para una densidad de 60 veh/km, más allá de la densidad crítica, puede notarse en la Figura 13 que aparentemente la trayectoria de los vehículos se observa en dirección contraria al flujo vehicular, lo que en realidad indica congestión vehicular. Sin embargo, no existe vehículos con velocidad cero (ver Figura 13 (b)), aunque se mueven a la derecha con una velocidad menor que v_{max} (256 km/h) lo que indica la presencia de flujo sincronizado, un estado donde los vehículos se mueven de manera coherente, con velocidades semejantes menores a la máxima

posible, pero no se estancan, lo que permite que el flujo vehicular se siga incrementando, aunque con una velocidad promedio menor, como se observa en la Figura 13 (b), correspondiente a las distribuciones de velocidad.

Flujo Libre:

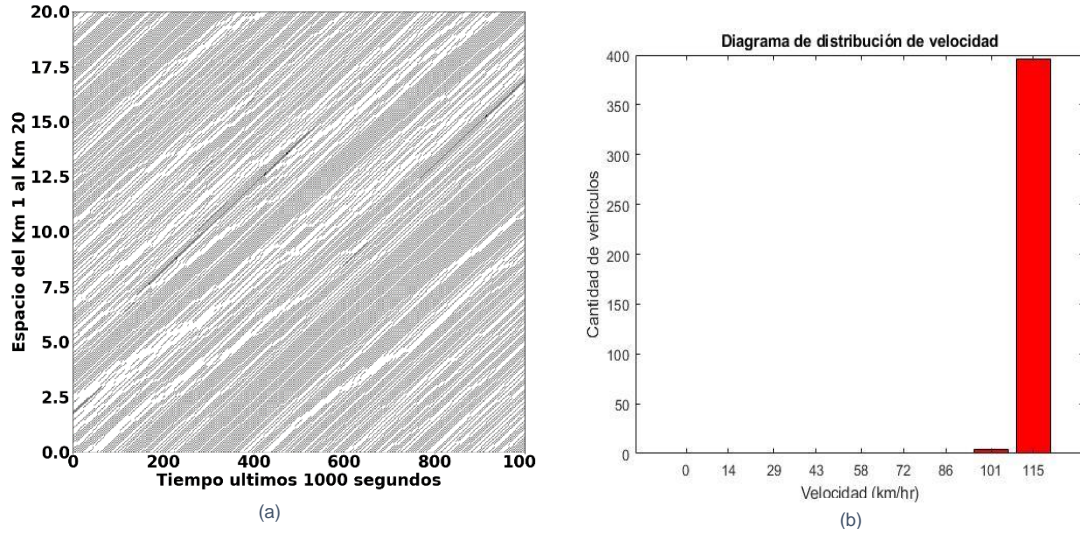


Figura 12: Diagrama espacio tiempo (a) y distribución de velocidad (b), para una densidad igual a 20 veh/km con vehículos autónomos.

Flujo sincronizado

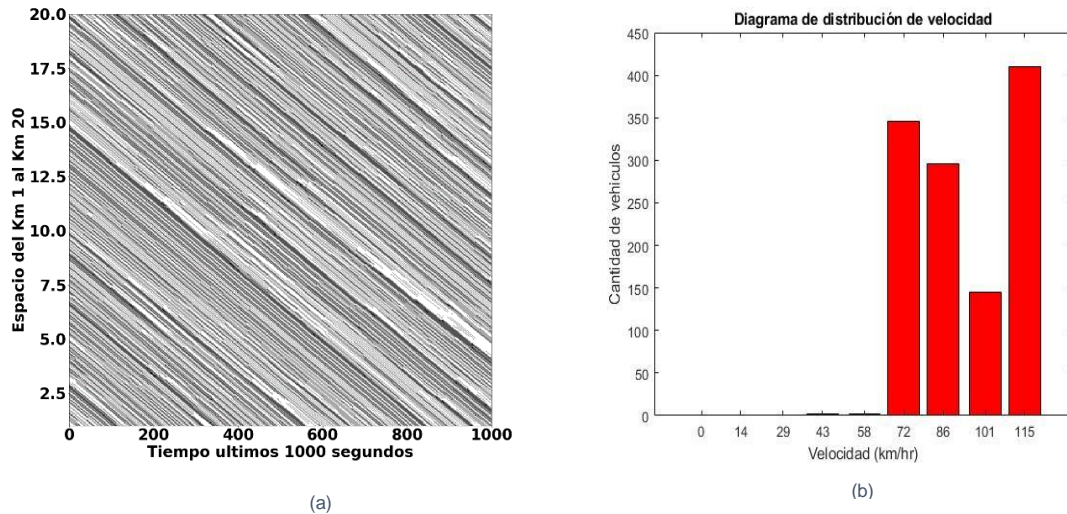


Figura 13: Diagrama espacio-tiempo (a) y distribución de velocidad (b) de la densidad 60 veh/km con vehículos autónomos.

En la Figura 14 y Figura 15, se muestra el diagrama espacio-tiempo y su correspondiente distribución de velocidades, para densidades de 140 veh/km y 160 veh/km, respectivamente. Como puede notarse, en ambos casos se aprecia que ya hay vehículos con velocidad 0, cuyo número se incrementa a medida que la densidad crece. Este estado congestionado indica la presencia de tráfico estancado, a partir del cual la velocidad y por lo tanto el flujo empiezan a decaer, aunque de manera gradual, a pesar de la alta densidad vehicular. A partir de una

densidad de 175 veh/km el flujo decae drásticamente, debido a que el espacio entre vehículos tiende a ser pequeño, que, considerando el cálculo de las distancias de seguridad, conlleva a que la acción que los vehículos toman sea frenado de emergencia y también es un efecto de las fronteras cerradas consideradas en este trabajo. Los resultados obtenidos indican los impactos de la introducción de los vehículos autónomos en el flujo vehicular y su desempeño, teniendo velocidades más altas para densidades más grandes.

Flujo congestionado:

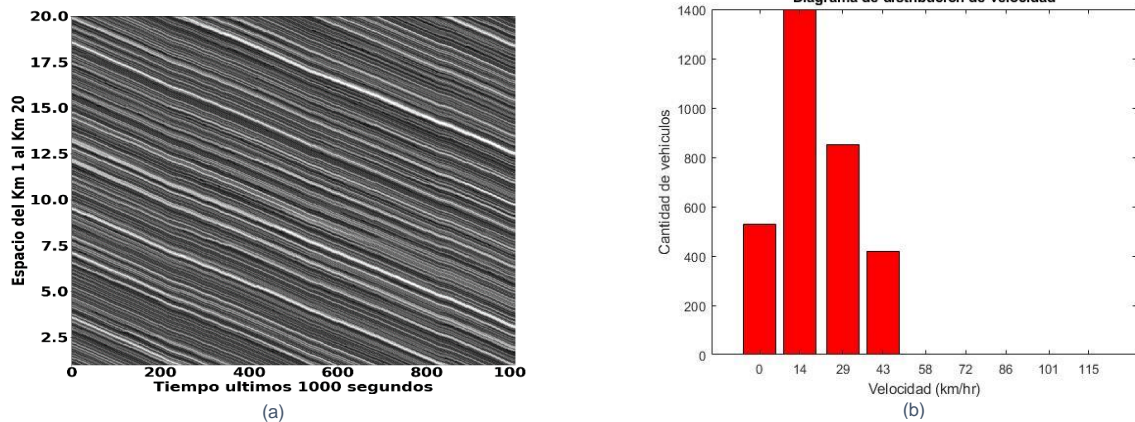


Figura 14: Diagrama espacio-tiempo (a) y distribución de velocidad (b) para una densidad de 140 veh/km con vehículos autónomos.

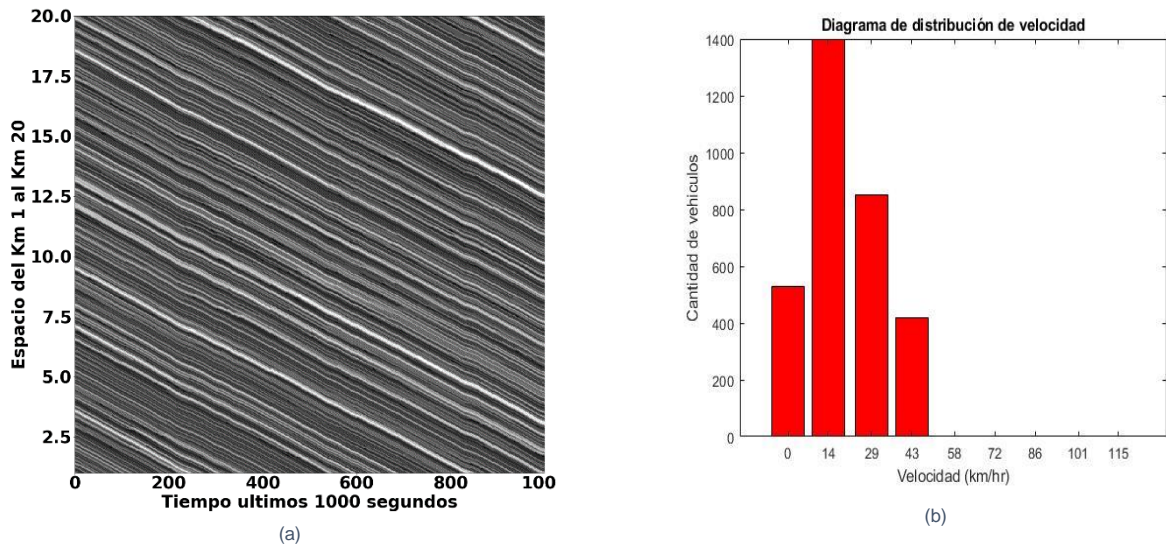


Figura 15: Diagrama espacio-tiempo (a) y distribución de velocidad (b) de la densidad 160 veh/km con vehículos autónomos.

8.2.2. Vehículos autónomos, con variación en factor de seguridad.

Por otra parte, los vehículos autónomos debido a sus capacidades y características han demostrado la resistencia a los choques en velocidades muy bajas que no implican daños para los conductores, ni los vehículos que impactan. De acuerdo con estudios experimentales [62], la velocidad a la que se puede producir un accidente sin daños graves varía de 4 a 8 km/hr. Así, como parte de las investigaciones realizadas en este trabajo de tesis, se realizaron estudios con base

en lo que se le nombró factor de seguridad, denotado por r . Con base en este factor de seguridad, es posible variar la distancia de seguridad mínima que un vehículo considera para tomar una acción sin producir colisiones graves; es decir, un valor menor de r implica una distancia de seguridad entre vehículos para acelerar, desacelerar o mantener su velocidad. Particularmente, se toman en cuenta valores de $r=0, 1$ y 2 m/s; los valores 1 y 2 m/s (equivalen a 3.6 y 7.2 km/h, respectivamente). El caso de $r=0$, corresponde al presentado en la sección previa.

Así, se analizó el comportamiento a través del diagrama fundamental de flujo-densidad y velocidad-densidad. Las figuras 16 y 17 muestran los resultados obtenidos para $r= 0, 1$ y 2 m/s, respectivamente, para un circuito de un solo carril con 100% de vehículos autónomos. Tal como se puede apreciar de estas figuras, tanto el flujo máximo (entendido como el flujo logrado con los vehículos moviéndose a una velocidad próxima a la velocidad máxima) como la densidad crítica donde éste se alcanza, se incrementa a medida que el r aumenta ya que la distancia de seguridad entre los vehículos se decrementa (menos conservador) y por lo tanto, los vehículos pueden seguir moviéndose cercano a la velocidad máxima en densidades mayores.

La figura 16 muestra que a partir de 140 veh/km, los vehículos comienzan a disminuir gradualmente en ambos casos (0 y -1). Sin embargo, la disminución es más rápida en el caso de $r=0$ m/s, ya que los vehículos tienen velocidades más bajas debido a una mayor distancia de seguridad. En los casos de $r=0$ m/s y -1 m/s, los espaciamientos entre los vehículos son más pequeños, lo que significa que cualquier perturbación afecta al otro. Además, a medida que la distancia de seguridad no se satisface más, ambos casos llegan a cero en 175 km/h. Esta reducción se debe a la discretización de las celdas, ya que las distancias de seguridad entre 0 m/s y -1 m/s no se distinguen de la misma manera que para $r= -2$ m/s.

Nótese, que para todos los casos se observa una segunda fase del flujo donde la velocidad promedio es inferior a la de flujo libre (prevalecen velocidades alrededor de un valor determinado mayor a cero), se decrementa gradualmente con la densidad, pero no hay vehículos estancados. Lo que permite que el flujo promedio se incremente con la densidad y que el rango de densidad donde este estado de flujo existe también crezca. Así, los valores de flujo alcanzados son de 6704 , 7579 y 8756 veh/hr para $r=0$, -1 y -2 m/s, respectivamente.

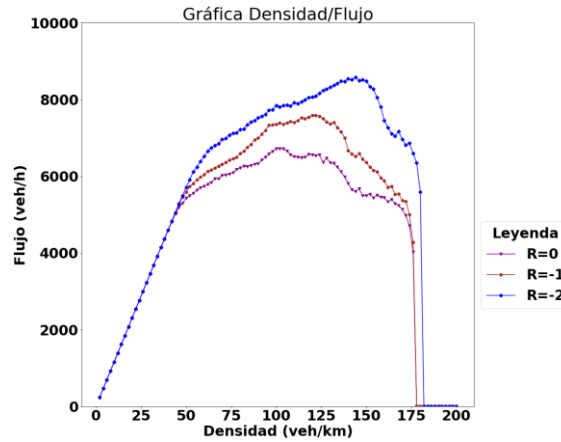


Figura 16: Diagrama fundamental, flujo-densidad. De color púrpura se muestra el diagrama con un factor de seguridad $r=0$, de color café el diagrama resulta de tomar un factor de seguridad $r=-1$; de color azul el diagrama resulta de considerar un factor de seguridad $r=-2$.

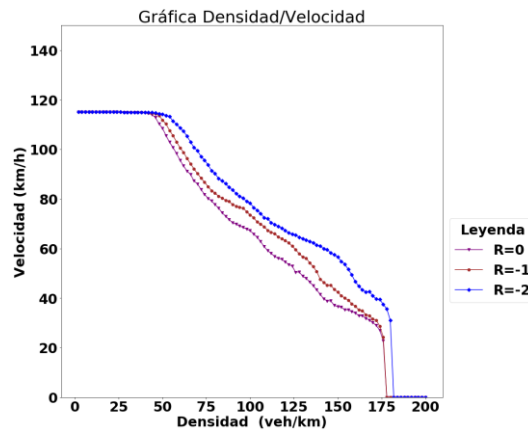
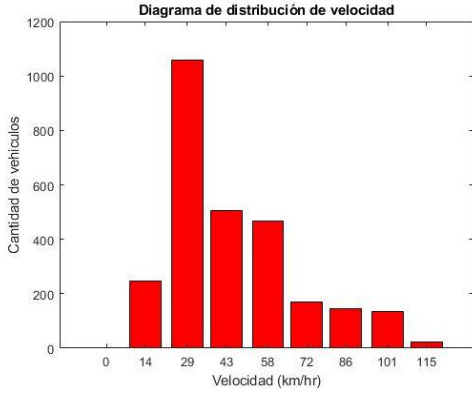
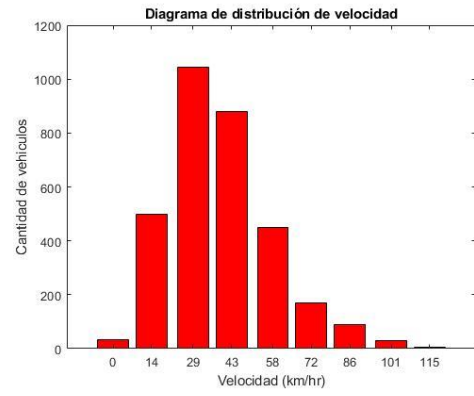


Figura 17: Diagrama fundamental, velocidad-densidad. De color púrpura se muestra el diagrama con un factor de seguridad $r=0$, de color café el diagrama resulta de tener en cuenta un factor de seguridad $r=-1$; de color azul el diagrama resulta de considerar un factor de seguridad $r=-2$.

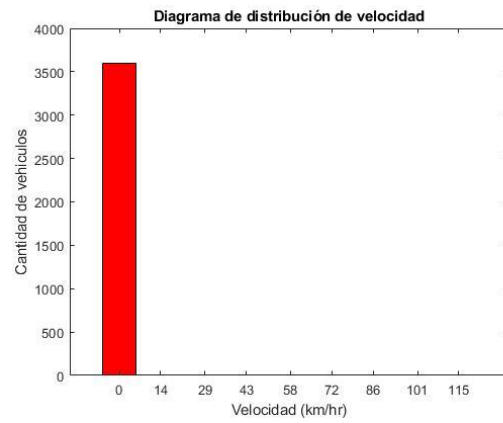
Además, como se aprecia en las distribuciones de velocidad para densidades de 140, 160 y 180 veh/km (correspondientes a un estado de flujo estancado) para $r=-1$ y $r=-2$ m/s, mostradas en la Figura 18 y Figura 19, respectivamente, durante el estado de flujo estancado, la cantidad de vehículos con velocidad cero es menor conforme r es mayor; por lo que el flujo vehicular es más alto con r mayor. Este comportamiento refleja la importancia de determinar la distancia de seguridad adecuada para determinar las acciones de los vehículos autónomos e impactar favorablemente en el comportamiento del flujo vehicular: menor distancia de seguridad mejora el desempeño del flujo, sin comprometer la seguridad vial.



(a)

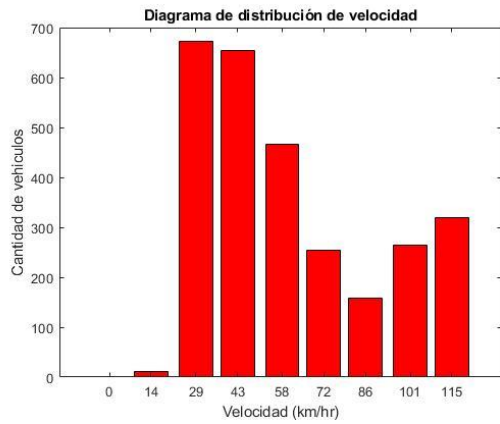


(b)

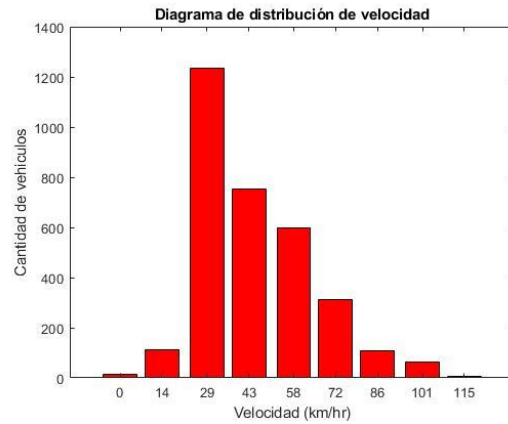


(c)

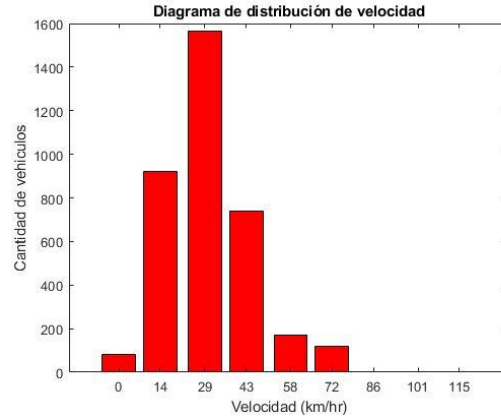
Figura 18: Distribución de velocidad para densidad igual a 140 veh/km (a), 160 veh/km (b), 180 veh/km (c) y $r = -1$ m/s.



(a)



(b)



(c)

Figura 19: Distribución de velocidad para densidad igual a 140 veh/km (a), 160 veh/km (b), 180 veh/km (c) para $r=-2$.

8.2.3. Simulación con tráfico vehicular mixto

Con la finalidad de investigar el comportamiento del flujo cuando se consideran vehículos mixtos en una vía de un carril, se realizaron simulaciones variando el nivel de penetración de los vehículos autónomos. Así, el experimento inicial se realizó con un porcentaje del 10% de vehículos convencionales y 90% de vehículos autónomos, posteriormente se fue variando el porcentaje de vehículos hasta llegar a un circuito solo con vehículos convencionales circulando. Se consideraron los mismos parámetros para ambos vehículos y se obtuvieron sus diagramas fundamentales densidad-flujo y velocidad-flujo, los cuales se muestran en la Figura 20 y la Figura 21, respectivamente.

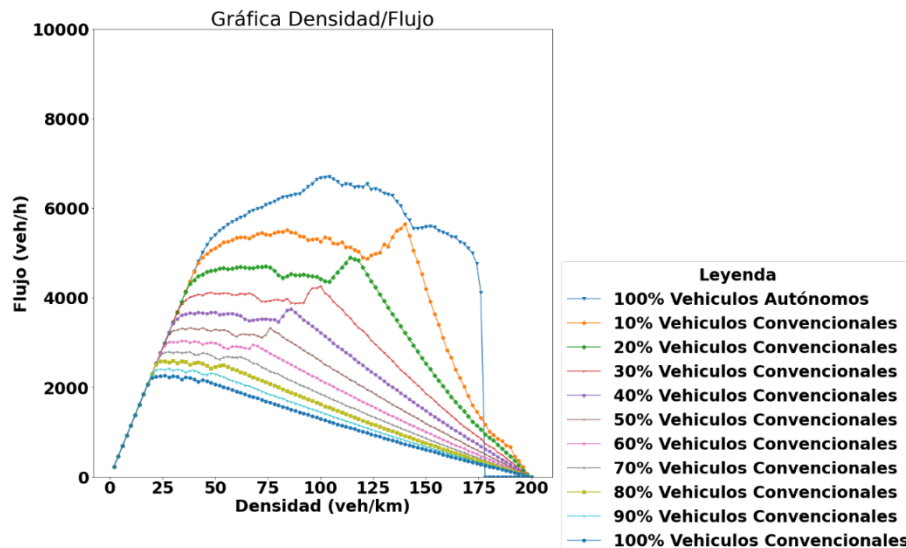


Figura 20: Diagrama fundamental flujo-densidad para 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100% de vehículos convencionales y 100% de vehículos autónomos con $r = 0$.

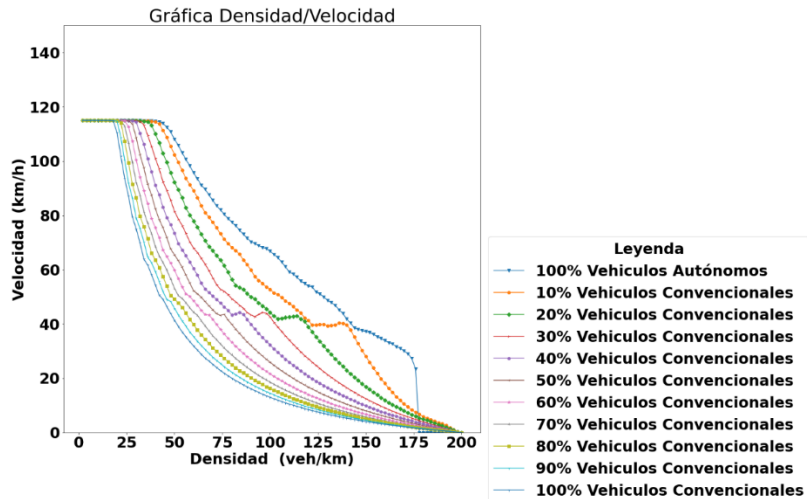


Figura 21: Diagrama fundamental velocidad-densidad para 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100% de vehículos convencionales y 100% de vehículos autónomos con $r = 0$.

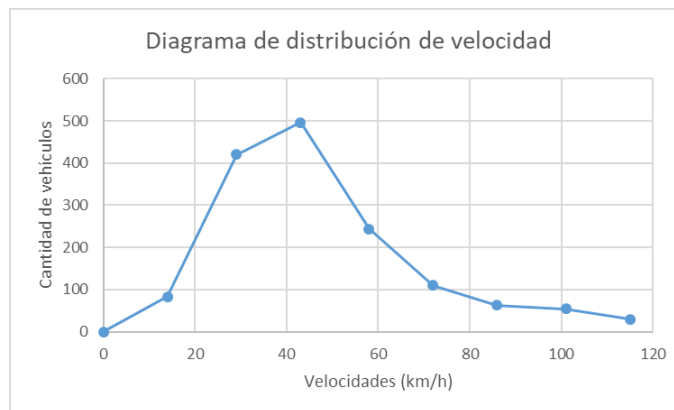


Figura 22: Diagrama de distribución de velocidad para 50% de vehículos autónomos con densidad de 75 veh/km.

Los resultados mostrados en las figuras 20 y 21 indican que, un nivel de penetración mayor de los vehículos autónomos conlleva a un flujo vehicular más alto y a la vez a una fase de flujo sincronizado en un rango de densidad extendido, es decir que entre más vehículos autónomos se tengan en el circuito, la velocidad con respecto a la densidad aumenta, traduciéndose en un aumento considerable del flujo vehicular.

Además, nótese que para niveles de penetración de los vehículos autónomos mayor a 50%, se aprecia un incremento del flujo vehicular (pendiente positiva) justo antes de que el flujo empiece a descender, ello se debe a que, para esos rangos de densidad, la velocidad promedio permanece casi constante (ver Figura 21); por lo que con el incremento de la densidad, el flujo vehicular se aumenta. Este comportamiento es consecuencia de que a mayor nivel de penetración (arriba del 50% de vehículos autónomos), se alcanza un valor de densidad donde la mayoría de los vehículos se mueven con velocidades semejantes (entre 28 y 43 km/h), justo antes de que surjan vehículos estancados (como se aprecia en la distribución de velocidad correspondiente mostrado en la figura 22). Como consecuencia, la velocidad promedio permanece alrededor de un cierto valor cercano a los 40 km/h, por lo que con el incremento de la densidad el flujo se empieza a incrementar justo

antes de que el flujo descienda (debido a la prevalencia de vehículos con velocidad 0). Aún más, las gráficas de distribución de velocidad también se pueden observar que entre mayor es el nivel de penetración de los vehículos autónomos, la cantidad de vehículos con velocidad 0 km/h es menor en densidades más altas. Lo que se traduce en un aumento de flujo de tráfico.

Por lo tanto, los resultados de simulación indican que aún en un circuito de un solo carril el flujo vehicular se mejora con la introducción de vehículos autónomos. Particularmente, el modelo LAI-EM propuesto reproduce de manera adecuada la interacción de tráfico vehicular mixto en un carril, ya que cuando incrementa el número de vehículos autónomos aumenta de manera directa el flujo vehicular.

8.3. Resultados de multicarril

Es fundamental destacar que, si bien la investigación en una vía de un solo carril es un paso importante como punto de partida, la realidad es que la mayoría de las vías se componen de más de un carril. Por lo que, en este apartado, se exponen los resultados obtenidos del modelo propuesto al evaluar una carretera de dos carriles. Las simulaciones se llevaron a cabo usando los valores de los parámetros de un solo carril descritos en la

Tabla 2. No se hace distinción de parámetros entre vehículos autónomos y convencionales, con la finalidad de apreciar si hay ventajas en la introducción de vehículos autónomos.

En el primer paso, se efectúan los cambios de carril y, posteriormente, se actualizan las posiciones y velocidades de los vehículos por separado en cada carril. Respecto a las modificaciones de carril, se llevan a cabo primero los cambios del carril izquierdo al derecho y luego del derecho al izquierdo. Un vehículo sólo puede cambiarse una sola vez en un instante de tiempo. Una vez que todos los cambios de carril se han realizado, las velocidades de los mismos son modificadas en cada carril de acuerdo con las reglas de actualización de velocidad establecidas en el modelo para un solo carril. Estas reglas de actualización de velocidad del modelo LAI-EM, numeradas como S3, son aplicadas y posteriormente los vehículos se desplazan hacia adelante en dirección longitudinal. Cabe destacar que en todos los casos se toma en cuenta un factor de seguridad $r=0$.

Al igual que en el modelo de un solo carril, se consideran 100 densidades diferentes que varían de 2 veh/km con una variación de 2 veh/km hasta llegar a una densidad máxima de 200 veh/km por carril.

Debido a los tiempos reducidos que tenía para concluir la tesis, se optó por presentar solamente resultados para 80% de vehículos autónomos, que eran los que eran consistentes y completos.

Se realizaron simulaciones considerando un escenario con vehículos autónomos (rojos) y convencionales (azules) a la vez.

Es importante mencionar que, se realizaron pruebas para distintas combinaciones del porcentaje de penetración de vehículos autónomos. Sin embargo, derivado de

complicaciones en el uso del clúster: demasiado tiempo de ejecución y fallas en el UPS que derivó en que los procesos se interrumpieran.

En la Tabla 3, se resumen los valores de los parámetros utilizados para los resultados que a continuación se muestran.

Parámetros	Valores
Longitud de celdas	$\Delta X = 0.125 \text{ m}$
Velocidad máxima	$v_{max} = 256 \text{ celdas/s}$ (115.2 km/h)
Aceleración normal	$a_n = 32 \text{ celdas/s}^2$ (4 m/s ²)
Aceleración máxima	$a_{max} = 64 \text{ celdas/s}^2$ (8 m/s ²)
Ruido	$R_s = 0.01$
Factor de seguridad	$r = (0)$
P_{change}	Para cambiar de carril hacia la derecha se emplea el valor 1, mientras que para cambiar hacia el carril izquierdo se usa el valor 0.1
Vehículos autónomos por carril	80% (3200 veh x carril)
Vehículos convencionales por carril	20% (800 veh x carril)

Tabla 3 Parámetros usados para las simulaciones del modelo multicarril.

Como punto inicial, comparamos el diagrama fundamental obtenido del modelo multicarril, con respecto al de un solo carril con los mismos valores para los parámetros (ver la figura 23). Como puede apreciarse desde el diagrama, el flujo promedio máximo cuando se tienen dos carriles es ligeramente más alto que el que se alcanza con un solo carril, como es de esperarse. Sin embargo, la densidad promedio, ρ_1 , donde se alcanza es mayor, lo que indica que se incrementa la capacidad de la vía, es decir, el número de vehículos que pueden fluir libremente aproximadamente. También puede notarse que, una vez que el flujo máximo se ha logrado, se aprecia una pendiente negativa entre las densidades promedio ρ_1 y ρ_2 , como puede notarse del diagrama velocidad-densidad que muestra la velocidad promedio por carril tanto para un solo carril como para el sistema multicarril, la velocidad promedio es mayor en el sistema multicarril de 60 veh/km aproximadamente, ello debido a que, como veremos más adelante, los vehículos autónomos aún se pueden mover a velocidad máxima y permanecen a la derecha. Pero posterior a ese valor la velocidad promedio desciende más rápido en el sistema multicarril que el de un solo carril, por las fluctuaciones de velocidad derivados de los cambios de carril.

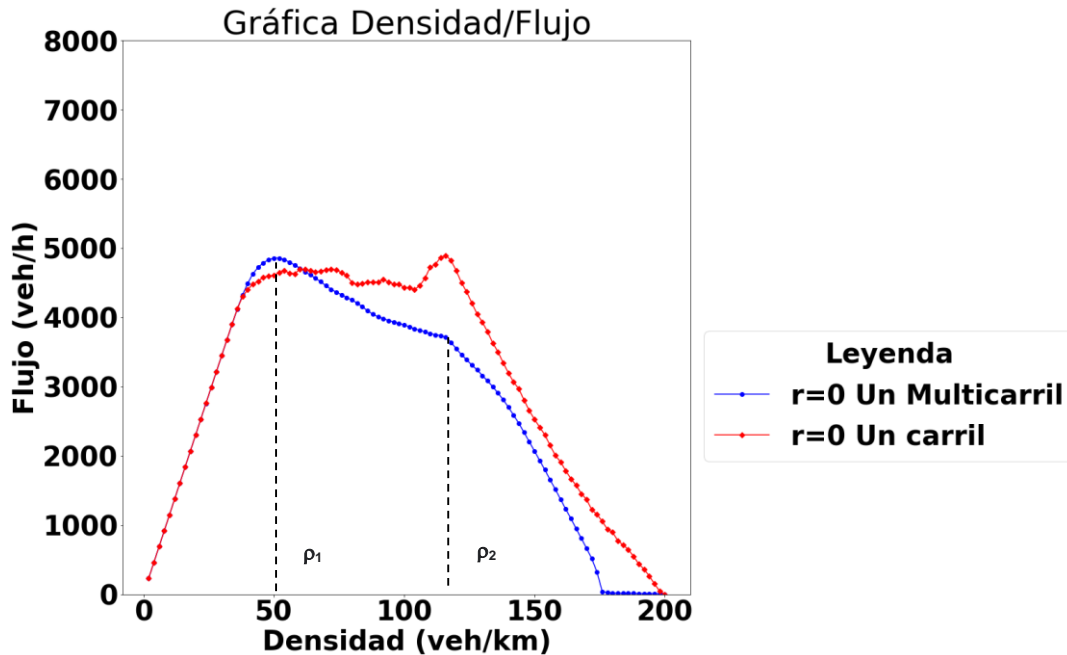


Figura 23: Diagrama fundamental resultante de un carril y dos carriles, considerando un 80% de vehículos autónomos.

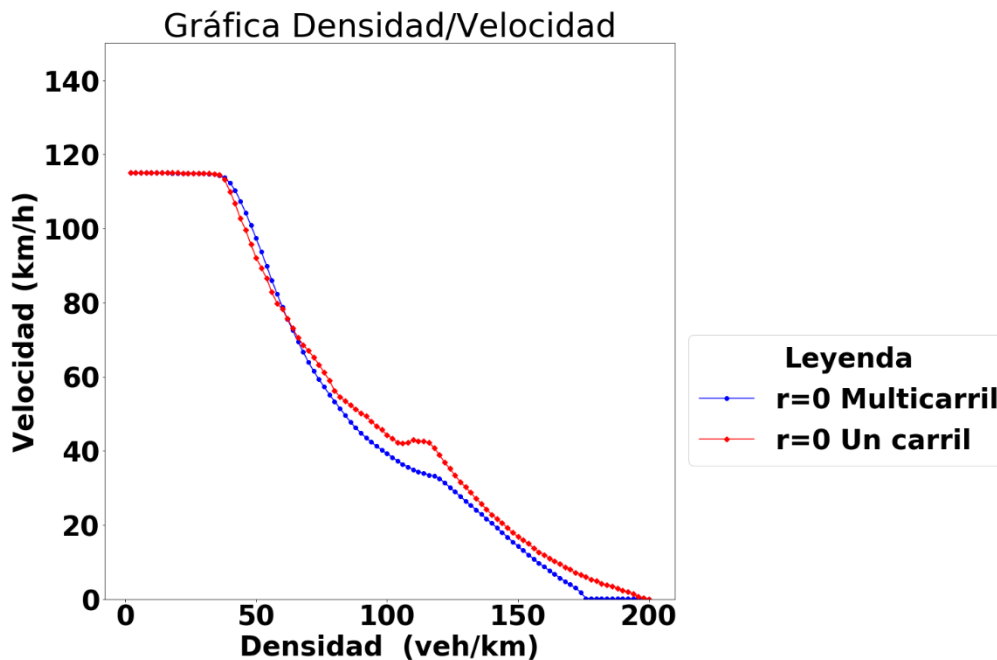


Figura 24: Diagrama de la velocidad promedio con respecto a la densidad. Para el caso del sistema multicarril se muestra la velocidad promedio por carril.

En la Figura 25 y la Figura 26, se muestra una instantánea de vehículos autónomos (rojos) y convencionales (azules) para los carriles izquierdo y derecho, para densidades de 50 veh/km y 80 veh/km, respectivamente. De ambas figuras se puede apreciar que, en la fase intermedia, a medida que se incrementa la densidad el rango de velocidades de los vehículos se disminuye; sin embargo, no hay

vehículos detenidos. En estas mismas figuras puede apreciarse que, los vehículos convencionales que se cambian al carril izquierdo dominan el flujo y forman pelotones de vehículos que están liderados por un vehículo convencional. Además, debido a que los vehículos convencionales requieren más distancia de seguridad para mantener una velocidad, se empiezan a cambiar antes al carril izquierdo, por lo que cuando los vehículos autónomos lo empiezan a hacer deben ajustarse a la velocidad de los convencionales. Por esta razón, después de que el flujo máximo se alcanza, la velocidad promedio empieza a decaer muy rápido por las perturbaciones que sufren en su velocidad los vehículos autónomos y se forma una pendiente negativa. Este comportamiento no sucede en un solo carril y por ello en ese caso permanece el flujo en la fase sincronizada. Para analizar mejor este desempeño, se analizó el desempeño del uso de carril.

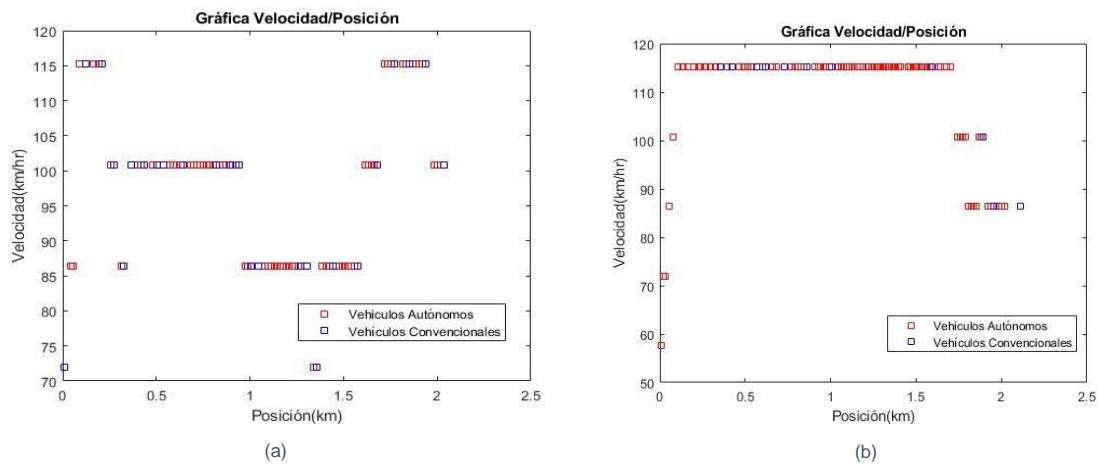


Figura 25: Instantánea del carril izquierdo (a) y derecho (b), respectivamente; para densidad de 50 veh/km.

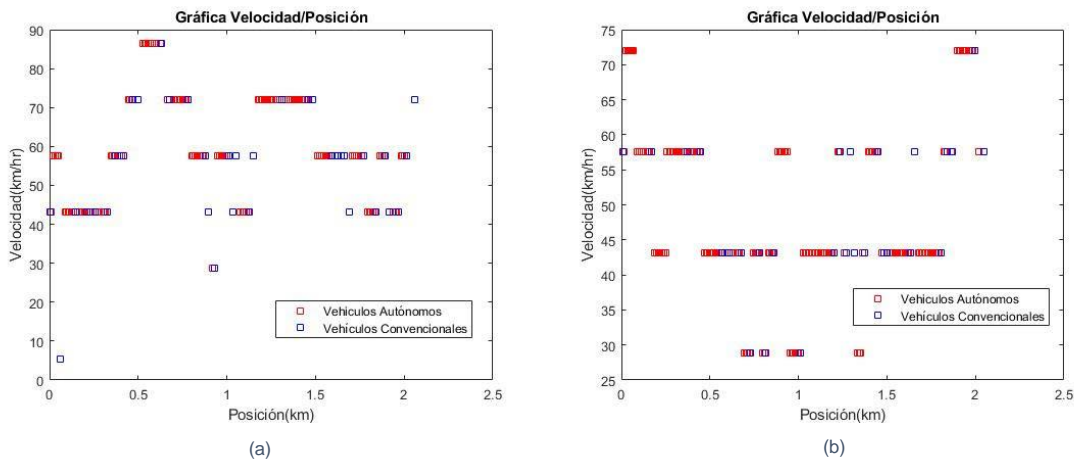


Figura 26: Instantánea del carril izquierdo (a) y derecho (b), respectivamente, para densidad de 80 veh/km.

El uso de carril, se refiere al porcentaje de vehículos en el carril de la izquierda y en el carril de la derecha, tanto para vehículos autónomos (ver Figura 27, (a)), como para vehículos convencionales (Figura 27, (b)). Nótese de estas figuras que, en el caso de los vehículos autónomos, el comportamiento de uso de carril es el

esperado, se mantienen a la derecha hasta que alrededor de la densidad de 40 veh/km ya no es posible mantengan su velocidad y se empiezan a cambiar a la izquierda generando una inversión de uso de carril con un 60% de los vehículos en el carril izquierdo (fenómeno observado en la realidad con puros vehículos convencionales). Este comportamiento permanece hasta que se empiezan a producir estancamientos alrededor de una densidad de 120 veh/km y eventualmente se reparten por igual entre los carriles con el incremento de la densidad. Nótese que, para el caso de los vehículos convencionales, se produce una pequeña inversión alrededor de una densidad de 26 veh/km, justo cuando los vehículos convencionales (que requieren una distancia de seguridad mayor para tomar una acción) ya no es posible mantengan su velocidad máxima y empiezan a cambiarse al carril izquierdo. Sin embargo, al momento que los vehículos autónomos se empiezan a cambiar a la izquierda, en una densidad de 40 veh/km, los vehículos convencionales permanecen en su mayoría en el carril derecho. Ello sucede porque si un vehículo convencional se cambia al carril izquierdo, se le obliga a regresar a la derecha, pero la diferencia con los vehículos autónomos es que cuando un vehículo desea volver a cambiarse a la izquierda ya no cumple la condición de seguridad y la gran mayoría (60%) permanece en carril derecho (baja velocidad).

Este comportamiento pudiera ser quizás diferente si se consideran dos aspectos:

- 1) Diferentes porcentajes de vehículos autónomos.
- 2) Se considera una baja probabilidad de realizar un cambio de carril hacia la derecha (semejante al modelo LAI-E multicarril), lo que le permite quedarse a la izquierda porque de otra manera funciona como si fueran vehículos lentos, que siempre deben regresar al carril derecho.

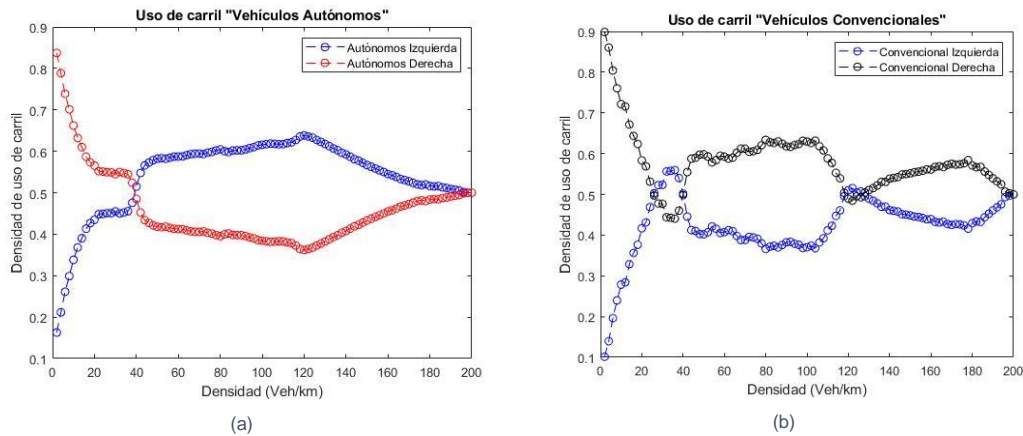


Figura 27: Uso de carril para los vehículos autónomos (a) y convencionales (b).

Finalmente, la Figura 28, muestra la inversión de uso de carril sin distinción de vehículos, este fenómeno se aprecia en las carreteras con cambio de carril asimétrico: al inicio los vehículos permanecen en el carril de baja velocidad (derecha) y conforme la densidad se incrementa, más vehículos se pasan al carril de alta velocidad (izquierdo) en la búsqueda de ir más rápido, pero con el incremento de la densidad ocasiona que pasen más vehículos por unidad de tiempo en el carril izquierdo en densidades altas que el derecho.

El modelo en varios carriles funciona adecuadamente. Sin embargo, se requiere hacer simulaciones con diferentes niveles de penetración, con el propósito de valorar mejor el comportamiento del tráfico vehicular mixto de vehículos autónomos y convencionales. Los resultados mostrados indican que la introducción de vehículos autónomos ayuda a mejorar la capacidad de la vía. Sin embargo, el hecho de que coexistan con los vehículos convencionales en una misma vía, conlleva aún a congestionamientos que no se pueden evitar y se deben buscar estrategias para ello y valorarse.

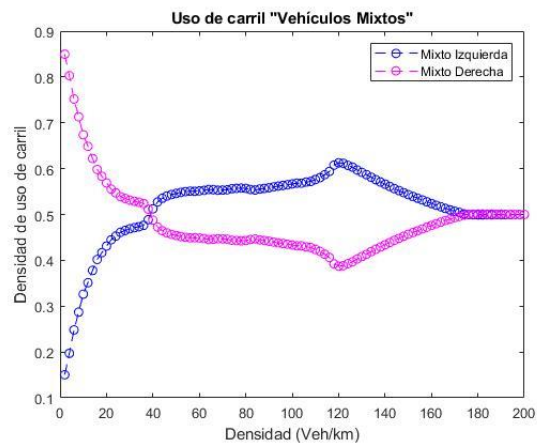


Figura 28: Uso de carril de tráfico mixto del modelo LAI-EM.

Capítulo 9 CONCLUSIONES

Este proyecto de tesis presenta una nueva propuesta de modelo para el tráfico vehicular mixto, que incluye vehículos convencionales y autónomos, basado en autómatas celulares (AC). Este modelo, denominado modelo LAI-EM, es una extensión del modelo LAI-E [47]. El modelo propuesto tiene como objetivo describir la dinámica de los vehículos en función de su capacidad acelerativa, características mecánicas y humanas, así como las reglas de conducción, prácticas de ingeniería de transporte y normativas viales. Además, el modelo se encarga de calcular las distancias de seguimiento seguras para cada vehículo, considerando un movimiento uniformemente acelerado.

Con el modelo LAI-EM es posible llevar a cabo simulaciones del tráfico vehicular mixto, considerando las capacidades reales de aceleración y desaceleración, así como las variaciones en la longitud y velocidad máxima de cada vehículo. A partir de las distancias de seguimiento seguras obtenidas del modelo LAI-E, se estableció un conjunto de reglas nuevas y sencillas para permitir a los vehículos cambiar de carril. Estas reglas tienen en cuenta tanto el espacio disponible como la velocidad relativa de los vehículos, lo que conduce a una dinámica más suave y natural, y reduce el movimiento brusco para obtener resultados más realistas.

El modelo toma en cuenta las capacidades y características de los vehículos autónomos debido a que están equipados con sensores que permiten detectar cambios en el ambiente de manera instantánea. Se incluyó el factor de seguridad r , con el objetivo de identificar el comportamiento del tráfico vehicular donde se consideran colisiones a velocidades relativas seguras de 1 m/s y 2 m/s.

Los resultados en una vía de un carril indican que la introducción de vehículos autónomos en el tráfico vehicular convencional, mejora el flujo máximo y capacidad de la vía. Un nivel de penetración más alto conlleva así a: un flujo vehicular más alto, una capacidad mayor y una fase sincronizada más amplia. Por lo que la introducción de vehículos autónomos sin duda ayuda a mejorar el flujo vehicular, sobre todo si la penetración de los mismos es al menos de un 50%. Aún más, un análisis con diferentes valores para distancia de seguridad mínima para los vehículos autónomos indica que el flujo máximo y capacidad pueden mejorarse aún más.

Por otra parte, los resultados de la simulación para una carretera de dos carriles asimétrico cuando se consideran 80% de vehículos autónomos indican que, la introducción de vehículos autónomos en el tráfico vehicular convencional permite mejorar la capacidad de la vía ampliamente. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los vehículos convencionales necesitan mayor distancia de seguridad para la toma de acciones que los vehículos autónomos, generando perturbaciones en el flujo vehicular. Por lo tanto, se debe estudiar el nivel de penetración adecuado para un flujo estable y funcional.

Con la presente tesis se desarrolló un modelo que permite simular de manera microscópica el tráfico vehicular mixto en uno y varios carriles, impactando en la literatura, así como a las ciencias computacionales y el área de transporte llegando a ser una herramienta para la toma de decisiones ante el despliegue del tráfico mixto en un futuro cercano. El modelo es computacionalmente simple y refleja de manera precisa el comportamiento de los conductores y los vehículos en la simulación.

9.1. Trabajos futuros

Se sugiere como posible trabajo a futuro llevar a cabo un análisis detallado de los estados de flujo vehicular en carreteras de múltiples carriles, abarcando:

- 1) Diferentes niveles de penetración de los vehículos autónomos.
- 2) Diferentes distancias de seguridad mínima.
- 3) Diferentes valores de los parámetros de cambio de carril más acordes al desempeño real.
- 4) Así como un análisis bajo escenarios de tráfico vehicular específicos: rampas de entrada, vías con condiciones de frontera abierta, etc.

Además, sería conveniente ampliar el modelo para incluir distintos niveles de automatización: vehículos conectados y autónomos. Además, analizar la estabilidad del flujo vehicular al momento de implementar estos tipos de vehículos.

Bibliografía

- [1] E. Onieva Caracuel, *Técnicas Difusas y evolutivas para el control de vehículos en entornos reales y virtuales*, Madrid, España: Tesis Doctoral, Universidad de Granada, CSIC - Centro de Automática y Robótica (CAR), 2011.
- [2] B. Ilja y H. Kotzab., «Intelligent transportation system development, main influences and key,» de *The Nofoma Conference*, , Lund, Sweden, 2017.
- [3] P. A. Abrantes y M. R. Wardman, «Meta-analysis of UK values of travel time: An update. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*,» vol. 45, nº 1, pp. 1–17, 2011.
- [4] R. S. Garciglia, «Vehículos Autónomos ¿Un vehículo que se conduce solo?,» *Saber Más, Revista de Divulgación*, pp. 196-2482, Accesado 08/05/2023.
- [5] A. Barredo, «Coche autónomo, el estado del arte: Hardware y Software [PODCAST],» *Programar Facil*, [En línea]. Available: <https://programarfacil.com/podcast/coche-autonomo-estado-del-arte/>. [Último acceso: 23 05 2023].
- [6] B. E. Marina, «Vehículos Autónomos,» Universidad de Valladolid, Junio 2019. [En línea]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/228073967.pdf>. [Último acceso: 24 Marzo 2022].
- [7] A. Martí-Belda Bertolín, L. Montoro González, I. Lijarcio, P. Bosó, C. López, R. Viladrich i Castellanas y J. Suárez Reyes, «Coche Autónomo, seguridad vial y formación de conductores.,» CNAE, Valencia, 2023.
- [8] R. D. López, «El futuro de la conducción autónoma,» Blog. Soluciones de Tecnología y Transformación Digital | knowmad mood.. [En línea]. [Último acceso: 23 05 2023].
- [9] M. Treiber, A. Kesting y D. Helbing, «Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models,» *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 360, nº 1, pp. 71-88, 2006.
- [10] M. Treiber, A. Kesting y D. Helbing, «Influence of reaction times and anticipation on stability of vehicular traffic flow,» *Transportation Research Record*, vol. 1999, nº 1, pp. 23-29, 2007.
- [11] S. Wolfram, «Cellular automata as models of complexity,» *Nature* 311.5985 (1984): 419-424., vol. 311, nº 5985, pp. 419-424, 1984.

- [12] S. Wolfram, «Universality and complexity in cellular automata.,» *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 10, nº 1-2, pp. 1-35, 1984.
- [13] S. Wolfram, Theory and applications of cellular automata: including selected papers 1983-1986, Singapore: Scientific World, 1986.
- [14] T. Toffoli y N. Margolous, Cellular automata machines: a new environment for modeling, MIT, Press, 1987.
- [15] J. Carvajal, «Un modelo para tráfico vehicular heterogéneo basado en autómatas celulares considerando movimiento uniformemente acelerado», Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2018.
- [16] C. Langton, «Self-reproduction in cellular automata,» *Physica D*, vol. 10, pp. 135-144, 1984.
- [17] D. Fagnant y K. Kockelman, «Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations,» *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 77, pp. 167-181, 2015.
- [18] M. E. Lárraga y L. Alvarez-Icaza, «A Cellular Automaton Model for Traffic Flow with Safe Driving Policies,» *Journal of Cellular Automata*, vol. 5, nº 6, 2010.
- [19] R. Cal y Mayor y J. Cárdenas, Ingeniería de tránsito, Fundamentos y Aplicaciones, México: Alfaomega, Séptima Edición, 1994.
- [20] L. Nieto Castillo, J. Roque Morales, H. Sánchez Pacheco y G. D. Veldéz Hernández, «Sistema Móvil de información vial SMIV,» <https://smiv.trabajoterminal.org/documento/>, México D.F., 2012.
- [21] B. Kerner, «The Physics of Traffic,» *Physics World*, vol. 12, nº 8, pp. 25, 2004.
- [22] B. S. Kerner, Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-Phase Traffic Theory, New York: Springer Berlin, 2009.
- [23] A. Schadschneider, D. Chowdhury y . K. Nishinari, Stochastic Transport in Complex Systems, Holanda: Elsevier, 2010.
- [24] D. Helbing, «Traffic and related self-driven many-particle systems,» *Reviews of modern physics*, vol. 73, nº 4, pp. 1067, 2001.
- [25] D. Chowdhury, L. Santen y A. Schadschneider, «Chowdhury, Debashish; Santen, Ludger; Schadschneider, Andreas, Simulation of vehicular traffic: A statistical physics perspective.,» *Computing in Science & Engineering*, vol. 2, nº 5, pp. 80-87, 2000.

- [26] R. Carlson, I. Papamichail y M. Papageorgiou, «Optimal mainstream traffic flow control of motorway networks.» *IFAC Proceedings Volumes, 2009*, vol. 42, nº 15, pp. 1-6, 2009.
- [27] K. Nagel y M. Schreckenberg, «A cellular automaton model for freeway traffic,» *Journal de Physique I, EDP Sciences*, vol. 2, nº 12, pp. 2221-2229, 1992.
- [28] N. Gartner, C. Messer y A. Rathi, «Traffic flow theory-A state-of-the-art report: revised monograph on traffic flow theory», Turner-Fairbank Highway Research Center, 2002.
- [29] B. S. Kerner, *The Physics of Traffic*, Berlin Heidelberg : Springer-Verlag , 2004.
- [30] B. De Moore y S. Maerivoet, «Cellular automata models of road traffic,» *Physics Reports*, vol. 419, nº 1, pp. 1-64, 2005.
- [31] D. Chowdhury, A. Schadschneider y K. Nishinari, «Physics of transport and traffic phenomena in biology: from molecular motors and cells to organisms.,» *Physics of Life reviews*, vol. 2, nº 4, pp. 318-352, 2005.
- [32] B. Schmittmann y R. Zia, «Statistical mechanics of driven diffusive systems. Phase transitions and critical phenomena,» *Phase transitions and critical phenomena*, vol. 17, pp. 3-214, 1995.
- [33] D. Chowdhury, L. Santen y A. Schadschneider, «Simulation of vehicular traffic: A statistical physics perspective.,» *Computing in Science & Engineering*, vol. 2, nº 5, pp. 80-87, 2000.
- [34] S. Krauß, P. Wagner y C. Gawron, «Metastable states in a microscopic model of traffic flow,» *Physical Review E* , vol. 55, nº 5, pp. 5597, 1997.
- [35] M. E. Lárrega y L. Alvarez-Icaza, «Cellular automaton model for traffic flow base on safe driving policies and human reactions.,» *Physica A: Statistical Mechanics and applications*, vol. 389, nº 23, pp. 5425-5438, 2010.
- [36] H. K. Lee, R. Barlovic, M. Schreckenberg y D. Kim, «Mechanical restriction versus human overreaction triggering congested traffic states.,» *Physical Review Letters*, vol. 92, nº 23, pp. 238-702, 2004.
- [37] K. Nagel, «From particle hopping models to traffic flow theory,» *Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1644, pp. 1-9, 1998.

- [38] G. H. Bham, Comparison of Characteristics and Computational Performance: Car-Following Versus Cellular Automata Models, Transportation Research Board 82nd Annual Meeting Transportation Research Board, 2003.
- [39] C.C. Hsu, Z.-S. Lin, Y.-C. Chiou y L. Lan, «Exploring traffic features with stationary and moving bottlenecks using refined cellular automata,» *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 7 , pp. 2502-2516, 2007.
- [40] R. Barlovic, L. Santen, A. Schadschneider y M. Schreckenberg, «Metastable states in cellular automata for traffic flow,» *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex System*, vol. 5, n° 3, pp. 793-800, 1998.
- [41] M. Fukui y Y. Ishibashi, «Phase diagram for the traffic model of two one-dimensional roads with a crossing.,» *Journal of the Physical Society of Japan* , vol. 65, n° 9, pp. 2793-2795, 1996.
- [42] M. Schreckenberg y D. Helbing, «Cellular automata simulating experimental properties of traffic flow,» *Physical Review E*, vol. 59, n° 3, pp. 2505, 1999.
- [43] R. Jiang y Q.-S. Wu, «First order phase transition from free flow to synchronized flow in a cellular automata model,» *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, vol. 46, n° 4, pp. 581-584, 2005.
- [44] B. Kerner, S. L. Klenov y D. E. Wolf, «Cellular automata approach to three-phase traffic theory,» *Journal of Physics A: Mathematical and General* , vol. 35, n° 47, pp. 9971, 2002.
- [45] W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider y M. Schreckenberg, «Towards a realistic microscopic description of highway traffic,» *Journal of Physics A: Mathematical and general* , vol. 33, n° 48, pp. 477, 2000.
- [46] M. E. Lárraga, J. A. del Río y A. Schadschneider, «New kind of phase separation in a CA traffic model with anticipation,» *Journal of Physics A: Mathematical and General* , vol. 37, n° 12, pp. 3769, 2004.
- [47] H. A. Gutiérrez, Modelo realista para simulación de tráfico vehicular mixto con autómatas celulares, Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, 2018.
- [48] H. A. Guzmán, M. E. Lárraga, L. Alvarez-Icaza y J. Carvajal, «A cellular automata model for traffic flow based on kinetics theory, vehicles capabilities and driver reactions,» *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 491, pp. 528-548, 2018.

- [49] H. A. Gutiérrez, Un modelo realista para el tráfico vehicular heterogéneo basado en el paradigma de autómatas celulares, Tesis Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.
- [50] S. Pettigrew, «Why public health should embrace the autonomous car.,» *Australian and New Zealand journal of public health*, vol. 41, nº 1, pp. 1-3, 2017.
- [51] W. Do, O. M. Rouhani y L. Miranda-Moreno., «Simulation-based connected and automated vehicle models on highway sections: a literature review.,» *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2019, 2019.
- [52] Schreurs, M. A. y S. D. Steuwer., «Autonomous driving-political, legal, social, and sustainability dimensions.,» *Autonomes fahren. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg*, pp. 151-173, 2015.
- [53] Goodin, Christopher y e. al., «Unmanned ground vehicle simulation with the virtual autonomous navigation environment.,» *International Conference on Military Technologies (ICMT). IEEE*, 2017.
- [54] Volkswagen Canarias, «¿Qué es el control de cruceo adaptativo? » [En línea]. Available: [https://www.vwcanarias.com/es/blog/control-de-cruceo-adaptativo.html#:~:text=El%20ACC%20\(tambi%C3%A9n%20conocido%20como,con%20los%20autom%C3%B3viles%20situados%20delante.](https://www.vwcanarias.com/es/blog/control-de-cruceo-adaptativo.html#:~:text=El%20ACC%20(tambi%C3%A9n%20conocido%20como,con%20los%20autom%C3%B3viles%20situados%20delante.) [Último acceso: 18 Mayo 2023].
- [55] D. Fagnant y K. Kockelman, «Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations,» *Transportation Research Part A: Policy and practice*, vol. 77, pp. 167-181, 2015.
- [56] W. Gruel y J. Stanford, «Assessing the Long-Term Effects of Autonomous Vehicles:,» *Transportation research procedia, European Transport Conference 2015 – from Sept 28 to Sept-30, 2015*, vol. 13, pp. 18-29, 2016.
- [57] P. A. Ioannou y C. Chien, «Autonomous Intelligent Cruise Control,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 42, nº 4, pp. 657-672, 1993.
- [58] B. van Arem, C. van Driel y R. Visser, «The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics,» *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, vol. 7, nº 4, pp. 429-436, 2006.
- [59] A. Kesting, M. Treiber y M. Schönhof, «Adaptive cruise control design for active,» *Transportation Research Part C: Emergent Technology*, vol. 16, nº 6, pp. 668-683, 2008.

- [60] A. Bose y P. Ioannou, «Mixed Manual/Semi-Automated Traffic: A Macroscopic Analysis,» *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 11, nº 6, pp. 429-462, 2003.
- [61] K. Seong-Woo y W. Liu, «Cooperative autonomous driving: a mirror neuron inspired intention awareness and cooperative perception approach,» *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 8, nº 3, pp. 23-32, 2016.
- [62] M. Levin y S. D. Boyles, «A multiclass cell transmission model for shared human and autonomous vehicle roads,» *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 62, pp. 103-116, 2016.
- [63] A. Sharma, Y. Ali, M. Saifuzzaman, Z. Zheng y M. M. Haque, «Human Factors in Modelling Mixed Traffic of traditional, connected and automated vehicles,» de *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, Springer, 2017, pp. 262-273.
- [64] H. van Lint, W. Schakel, T. Guus, P. Knoppers y A. Verbraeck, «Getting the human factor into traffic flow models – a new opensource design to simulate next-generation traffic operations,» *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2561, nº 1, pp. 25-33, 2016.
- [65] D. Ngoduy, «Application of gas-kinetic theory to modelling mixed traffic of manual and ACC vehicles.,» *Transportmetrica*, vol. 8, nº 1, pp. 43-60, 2012.
- [66] K. Nagel, High-speed microsimulations of traffic flow, Colonia, Alemania: Ph. D. thesis, University of Cologne, 1995.
- [67] R. Jiang y Q. S. Wu, «The adaptive cruise control vehicles in the cellular automata model,» *Physics Letters A*, vol. 359, nº 2, pp. 99-102, 2006.
- [68] X. Qiu, L. N. Ma, X. X. Zhou y D. Yang, «The mixed traffic flow of manual-automated driving based on safety distance,» *Journal of Transportation Systems Engineering and Information*, vol. 16, nº 4, pp. 101-108, 2016.
- [69] Q. Yan-Yan, W. Hao, W. Wei y W. Qian, «Stability analysis and fundamental diagram of heterogeneous traffic flow mixed with cooperative adaptive cruise control vehicles,» *Acta Physica Sinica*, vol. 66, nº 9, pp. 094502 , 2017.
- [70] L. Liu, L. Chunyuan, L. Yongfu, P. Srinivas y L. Lei, «Car-following behavior of connected vehicles in a mixed traffic flow: modeling and stability analysis,» de *2018 IEEE 8th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, IEEE, 2018, pp. 1085-1088.

- [71] R. Mohajerpoor y M. Ramezani, «Mixed flow of autonomous and human-driven vehicles: Analytical,» *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Elsevier*, vol. 109, pp. 194-210, 2019.
- [72] A. Ghiasi, O. Hussai, Z. Qian y X. Li, «A mixed traffic capacity analysis and lane management model for connected automated vehicles: A Markov chain method,» *Transportation Research Part B: Methodological, Elsevier*, vol. 106, pp. 266-292, 2017.
- [73] Y. Liu, J. Guo, J. Taplin y Y. Wang, «Characteristic Analysis of Mixed Traffic Flow of Regular and Autonomous Vehicles Using Cellular Automata,» *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2017, 2017.
- [74] T. Wietholt y J. Harding, «Influence of Dynamic Traffic Control Systems and Autonomous Driving on Motorway Traffic Flow,» *Transportation Research Procedia*, vol. 15, pp. 176-186, 2016.
- [75] S. Gong y L. Du, «Cooperative platoon control for a mixed traffic flow including human drive vehicles and connected and autonomous vehicles,» *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 116, pp. 25-61, 2018.
- [76] T. Vranken y M. Schreckenberg, «Modelling multi-lane heterogeneous traffic flow with human-driven, automated, and communicating automated vehicles,» *Physica A: Statistical Mechanics and applications*, vol. 589, nº 1, pp. 126629, 2022.
- [77] M. Jouvencel, «Deformación del vehículo y lesiones del ocupante en Colisiones a Baja Velocidad. La importancia del parachoques.,» 01, 2005. [En línea]. Available: <https://www.peritajemedicoforense.com/JOUVENCE27.htm>. [Último acceso: 12 11 2022].
- [78] Intel, «Trazar el camino hacia el futuro: infraestructura vial inteligente,» Mayo 2020. [En línea] Available: intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/guides/intelligent-road-infrastructure-ebook.pdf. [Último acceso: 24 Marzo 2021].
- [79] C. G. D. Castillo, «Los sistemas inteligentes de transporte. sus aplicación a los modos terrestres, maritimos y aereos,» Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Fomento ©.
- [80] M. Sipper, *The evolution of parallel cellular machine: The cellular programming approach.*, Berlin, Alemania: Heidelberg: Springer Berlin, 1997.

- [81] D. Helbing y B. A. Huberman, «Coherent Moving States in Highway Traffic,» *Nature*, vol. 396, nº 6713, pp. 738-740, 1998.
- [82] J. T. Baldwin y S. Saharon, «On the classifiability of cellular autómatas.,» *Theoretical Computer Science*, vol. 230, nº 1-2, pp. 117-129, 2000.
- [83] G. Cattaneo, E. Formenti y L. Margara, «On the dynamical behavior of chaotic cellular autómatas.,» *Theoretical Computer Science*, vol. 212, nº 1, pp. 31-51, 1999.
- [84] M. E. Lárraga, Un autómatas celular probabilista para la simulación del tránsito de automóviles automatizados., Ciudad de México: Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2001.
- [85] L. Lan, Y.-C. Chiou, Z.-S. Lin y C.-C. Hsu, «A refined celular automaton model to rectify impractical vehicular movement behavior.,» *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 388, nº 18, pp. 3917-3930, 2009.
- [86] M. Rickert, K. Nagel, M. Schreckenberg y A. Latour, «Two lane traffic simulations using cellular automata,» *Physica A: Statistical Mechanics*, vol. 231, nº 4, pp. 534-550, 1996.
- [87] S. Maerivoet, Modelling traffic on motorways:state-of-the-art, numerical data analysis, and dynamic traffic assignment, Bélgica: Phd thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2006.
- [88] G. H. Bham y R. F. Benekohal, «A high fidelity traffic simulation model based on cellular automata and car-following concepts,» *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* , vol. 12, nº 1, pp. 1-32, 2004.