



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

CENTRO UNIVERSITARIO UAEM VALLE DE MÉXICO

**Análisis, Modelado y Simulación de Tráfico Vehicular
Mediante Sistemas Multiagente**

TESIS

Que para obtener el Grado de

INGENIERO EN COMPUTACIÓN

Presentan

**C. FRANCISCO JAVIER PLATA GARCÍA
C. CÉSAR RAMÍREZ MONROY**

**Asesor: DR. HÉCTOR RAFAEL OROZCO AGUIRRE
Co-Asesor: DR. VÍCTOR MANUEL LANDASSURI MORENO**

Atizapán de Zaragoza, Edo. de Méx. Agosto de 2018



Centro Universitario
UAEM Valle de México

Resumen

Actualmente, las grandes ciudades se encuentran ante una difícil situación de sobrepoblación, con un constante incremento en la cantidad de vehículos, lo cual viene provocando que día a día se vivan congestionamientos vehiculares. Este problema crea dificultades y hace que se consuma una mayor cantidad de tiempo para el traslado de un lugar a otro.

En las vialidades tales como avenidas, autopistas, cruces viales, cruceiros o intersecciones, el tráfico vehicular se debe a diversas razones tales como el mal estado de las calles, la mala planeación de las rutas, el clima, inadecuada sincronización de los semáforos, así como también la falta de educación vial que muestran ambos, los conductores y los peatones.

Es posible evitar o disminuir en lo posible el congestionamiento en los cruces y caminos principales realizando un análisis de los factores que lo causan, un correcto planteamiento del proyecto y si es viable la creación de semáforos inteligentes, capaces de dar prioridad a los caminos más saturados, disminuyendo la carga vehicular y evitando a su vez posibles accidentes y embotellamientos.

Para validar esto, se creó el modelado virtual del cruceiro vial denominado "Puerto de Chivos" el cual se encuentra entre los límites de los municipios de Nicolás Romero y Atizapán de Zaragoza en el Estado de México. Este modelo refleja los factores que influyen en el tránsito vehicular de la zona a lo largo de diversas horas del día, mediante los cuales es posible realizar simulaciones virtuales para encontrar y diseñar estrategias de mejora que conlleven a agilizar la circulación vial. Este modelo se creó mediante el uso del software denominado AnyLogic, el cual es una plataforma capaz de ofrecer simulaciones en 2D y 3D mediante el empleo de un sistema multiagente.

Abstract

Nowadays large cities are facing a difficult situation of overcrowding, with a constant increase in the number of vehicles, which is causing daily vehicular traffic congestion. This problem creates difficulties and causes a greater amount of time to be taken to move from one place to another.

On roads such as avenues, highways, road junctions, crossings or intersections, vehicular traffic is due to various reasons such the bad conditions of the streets, poor planning of the routes, weather, inadequate synchronization of traffic lights, as well as the lack of road safety education shown by both drivers and pedestrians.

It is possible to avoid or reduce as much as possible the congestion at the intersections and main roads by analyzing the factors that cause it, a correct approach to the project and if feasible the creation of intelligent traffic lights, capable of giving priority to the most saturated roads, reducing the vehicle load and avoiding possible accidents and traffic jams.

To validate this, the virtual modeling of the highway crossing named "Puerto de Chivos" was created, which is located between the limits of the municipalities of Nicolás Romero and Atizapán de Zaragoza in the State of Mexico. This model reflects the factors that influence vehicular traffic in the area during various hours of the day, through which it is possible to carry out virtual simulations to find and design improvement strategies that lead to speeding up road traffic. This model was created by using the software called AnyLogic, which is a platform capable of offering simulations in 2D and 3D through the use of a multi-agent system.

Índice de contenido

Lista de figuras	V
Lista de tablas	VII
Lista de acrónimos	IX
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4. Delimitación o alcances de la investigación	4
1.5. Hipótesis	4
1.6. Justificación	5
1.7. Fundamentación inicial	5
1.7.1 Naturaleza del ambiente de los agentes	5
1.7.2 Características y/o propiedades.....	6
1.7.2.1 Autonomía.....	6
1.7.2.2 Iniciativa	6
1.7.2.3 Sociabilidad.....	6
1.7.2.4 Funciones	6
1.7.3 Tipos de agentes.....	7
1.7.3.1 Agente simple	7
1.7.3.2 Agente basado en modelos	7
1.7.3.3 Agente basado en objetos	7
1.7.3.4 Agente basado en utilidad.....	7
1.7.3.5 Agente de aprendizaje	7
1.7.4 Clasificación de entornos para agentes	7
1.7.4.1 Por su capacidad de observación	8
1.7.4.2 Por la determinación del siguiente estado	8
1.7.4.3 Con base en la experiencia del agente	9
1.7.4.4 Según la dinámica del entorno.....	9
1.7.5 Sistemas Multi-Agente (SMA)	9
1.8. Metodología	9
1.8.1 Propuesta.....	10
1.8.2 Vista general de la propuesta a desarrollar.....	10
1.8.3 Diagramas de secuencia.....	11

1.8.3.1 Acciones generales.....	11
1.8.3.2 Incrementar y disminuir velocidad.....	12
1.8.3.3 Cambio de carril hacia la izquierda o derecha	13
1.8.3.4 Dar vuelta hacia la izquierda o derecha	14
1.8.3.5 Chocar	15
1.8.3.6 Tocar claxon.....	16
1.8.3.7 Encender y apagar luces frontales.....	16
1.8.3.8 Detenerse	17
1.8.3.9 Acciones generales con módulo de semáforos.....	17
Capítulo 2 Fundamentos de modelado y simulación en la dinámica urbana del tráfico vehicular	19
2.1 Introducción	19
2.2 Conceptos básicos.....	19
2.2.1 Sistema	20
2.2.2 Subsistema	21
2.2.3 Modelo	21
2.2.4 Objeto	23
2.2.5 Marco experimental.....	24
2.2.6 Experimentación	25
2.2.7 Simulación	25
2.2.8 Verificación	28
2.2.9 Validación	28
2.3 Tipos y modos de simulación.....	29
2.3.1 Clasificación de sistemas.....	29
2.3.2 Tipos de simulación	30
2.3.3 Clasificación de los modelos	31
2.4 Fases y etapas de la simulación	36
2.4.1 Formulación del problema.....	37
2.4.2 Definición del sistema	37
2.4.3 Formulación del modelo.....	37
2.4.4 Colección de datos.....	38
2.4.5 Implementación del modelo	38
2.4.6 Verificación	38
2.4.7 Validación	38

2.4.8	Diseño de experimentos	38
2.4.9	Experimentación	39
2.4.10	Interpretación	39
2.4.11	Implementación.....	39
2.5	Incertidumbre en el modelado.....	39
2.6	Ventajas y desventajas de la simulación.....	40
2.7	¿Cuándo emplear la simulación por computadora?.....	40
2.7.1	Resolución analítica vs simulación.....	41
2.7.2	Simulación de Montecarlo	41
Capítulo 3	Tráfico y congestionamiento vehicular	43
3.1	¿Qué es el tráfico vehicular?	43
3.2	Análisis de un sistema de control y reducción de tráfico vehicular	44
3.2.1	Estrategias y metodología.....	44
3.2.2	Especificaciones de módulos.....	46
3.3	Simulación de tráfico vehicular	47
3.3.1	Simulación microscópica.....	47
3.3.2	Simulación mesoscópica.....	48
3.3.3	Simulación macroscópica	49
3.3.4	Simulación microscópica vs mesoscópica vs macroscópica.....	50
3.3.5	Simulación de escenarios viales	52
3.4	Definir un flujo vehicular.....	53
3.4.1	Lógica de control de velocidad y cambio de carril en vehículos.....	54
3.5	Implementación de semáforos	57
3.6	Simulación de tráfico vehicular basada en agentes	58
3.6.1	Sistemas Multiagentes	58
Capítulo 4	Creación de un modelo de tráfico vehicular en AnyLogic.....	59
4.1	Biblioteca de tráfico rodado.....	59
4.1.1	Animación en color del diagrama de flujo en ejecución	63
4.2	Modelando un cruce vial	64
4.2.1	Crear un nuevo modelo.....	64
4.2.2	Agregar un diseño sobre el lienzo o canvas de diseño	66
4.2.3	Dibujar las vialidades	68
4.2.4	Crear los cruces o intersecciones	70
4.3	Creación de agentes para representar vehículos	75
4.3.1	Agente Automóvil	75
4.3.2	Agente TransportePúblico.....	77
4.4	Diagrama de flujo vehicular de la red vial del modelo	77

4.4.1 Crear el diagrama de flujo del modelo	78
4.4.2 Colocar semáforos	79
4.5 Configuración de la red vial.....	82
4.5.1 Sentido del flujo vehicular	82
4.5.2 Descriptor de la red vial	84
4.5.3 Mapa de densidad de tráfico vehicular.....	84
4.6 Animación 3D del modelo	85
4.6.1 Navegación a través de la animación 3D	86
4.7 Ejecución del modelo generado.....	87
4.8 Evolución del modelo para representar un mejor escenario 3D.....	88
Capítulo 5 Conclusiones y trabajo futuro	91
Capítulo 6 Referencias	93

Lista de figuras

Figura 1.1 Diagrama general de la propuesta a desarrollar	11
Figura 1.2 Acciones generales de un automóvil	12
Figura 1.3 Incremento y disminución de velocidad de un automóvil	13
Figura 1.4 Cambio de carril hacia la izquierda o derecha de un automóvil	14
Figura 1.5 Vuelta hacia la izquierda o derecha de un automóvil	15
Figura 1.6 Choque de un automóvil.....	15
Figura 1.7 Toque de claxon de un automóvil	16
Figura 1.8 Encender y apagar luces frontales de un automóvil.....	16
Figura 1.9 Secuencia para que un automóvil se detenga	17
Figura 1.10 Acciones generales con módulo de semáforos.....	18
Figura 2.1 De la realidad a su representación parcial o total en un modelo	24
Figura 2.2 Comparación en un sistema y el marco experimental.....	25
Figura 2.3 Fuentes de información para la construcción de un modelo	26
Figura 2.4 Morfismo ente modelado y simulación.....	27
Figura 2.5 Actividades de la verificación y validación	29
Figura 3.1 Simulación microscópica del tráfico vial.....	48
Figura 3.2 Simulación mesoscópica del tráfico vial.....	49
Figura 3.3 Simulación macroscópica del tráfico vial	50
Figura 3.4 Vista de los niveles de simulación del tráfico vial.....	51
Figura 4.1 Código de animación por color para distinguir el estado actual de un bloque ..	63
Figura 4.2 Esquema de color básico de bloques	63
Figura 4.3 Esquema de color complejo de bloques	64
Figura 4.4 Imagen satelital del cruceo vial “Puerto de Chivos”	65
Figura 4.5 Creación de un nuevo modelo de tráfico vehicular en AnyLogic	66
Figura 4.6 Vista de edición del “ModeloTráficoVehicularCruceoVialPuertoDeChivos” creado	66
Figura 4.7 Paleta de presentación y sus componentes.....	67
Figura 4.8 Imagen satelital agregada como diseño al lienzo del modelo de tráfico vehicular	67
Figura 4.9 Habilitar/Deshabilitar rejilla de la cuadrícula del editor gráfico de diseño	68
Figura 4.10 “Paleta Biblioteca de tráfico rodado”	68
Figura 4.11 Activación para dibujar punto a punto una vialidad o camino.....	69
Figura 4.12 Vialidad dibujada para crear la red vial	69
Figura 4.13 Vista de las propiedades de una vialidad o camino	69
Figura 4.14 Cruceo o intersección generada automáticamente para unir dos vialidades.	70
Figura 4.15 Activación/desactivación de los flujos de circulación entre vialidades en un cruceo	70
Figura 4.16 Arrastre y colocación de un estacionamiento sobre una vialidad	72
Figura 4.17 Configuración de las propiedades de un estacionamiento sobre una vialidad	72
Figura 4.18 Arrastre y colocación de una parada de autobús sobre una vialidad	73
Figura 4.19 Configuración de las propiedades de una parada de autobús sobre una vialidad	73
Figura 4.20 Red vial completa sobre la imagen satelital del cruceo vial representado	74
Figura 4.21 Ajuste del elemento escala del modelo creado.....	74
Figura 4.22 Creación del agente “Automóvil” desde cero	76
Figura 4.23 Elección de la animación 3D “Auto” para el agente “Automóvil”	76
Figura 4.24 Ajuste y configuración de propiedades de la representación 3D del agente “Automóvil”	77

Figura 4.25 Objeto “Colección” para animar aleatoriamente al agente “Automóvil”	77
Figura 4.26 Configuración del agente “TransportePúblico”	78
Figura 4.27 Conexión de los bloques más comunes de la biblioteca de tráfico rodado	79
Figura 4.28 Propiedades establecidas para un bloque de tipo CarSource.....	80
Figura 4.29 Diagrama de flujo vehicular para la red vial creada	80
Figura 4.30 Colocación de un bloque “Semáforo” y su configuración de propiedades.....	82
Figura 4.31 Cambio de color de una fase de semáforo en el editor gráfico	82
Figura 4.32 Valor de altura en el eje “Z” para las vialidades	83
Figura 4.33 Descriptor de la red vial del modelo.....	84
Figura 4.34 Personalización del mapa de densidad vehicular de una red vial	86
Figura 4.35 Colocación y configuración de una ventana 3D para el modelo.....	87
Figura 4.36 Botón de navegación de la vista de área.....	87
Figura 4.37 Mandar a construir y ejecutar el modelo creado	87
Figura 4.38 Correr la ejecución del modelo creado	87
Figura 4.39 Ejecución 2D del modelo de tráfico vehicular y su mapa de densidad vehicular	88
Figura 4.40 Ejecución 3D del modelo de tráfico vehicular y su mapa de densidad vehicular	88
Figura 4.41 Primera vista de la ejecución en 3D de la evolución del escenario en el modelo.....	89
Figura 4.42 Segunda vista de la ejecución en 3D de la evolución del escenario en el modelo.....	89
Figura 4.43 Vista de la ejecución en 2D de la evolución del escenario en el modelo.....	90

Lista de tablas

Tabla 2.1 Aproximaciones principales para la construcción de un modelo26

Lista de acrónimos

CC: Ciencias Computacionales

IA: Inteligencia Artificial

SMA: Sistemas Multiagente

RV: Realidad Virtual

Capítulo 1 Introducción

Actualmente, los sistemas multiagente (SMA) (Gómez Sanz, 2003) constituyen un área de creciente interés dentro de la Inteligencia Artificial (IA), debido a su capacidad de adaptación para dar solución a problemas complejos no resueltos de manera satisfactoria mediante otras técnicas. Numerosas aplicaciones basadas en este paradigma han sido empleadas en infinidad de áreas, tales como control de procesos, procesos de producción, control de tráfico aéreo, aplicaciones comerciales, comercio electrónico, aplicaciones médicas, monitorización de pacientes en cuidados intensivos, juegos, entre otras como control y simulación de tráfico vehicular.

Uno de los problemas en las grandes áreas urbanas, como lo es la Zona Metropolitana del Valle de México, es la congestión vehicular que se presenta en los principales cruces en ciertas horas del día. Esto trae consigo un sin número de problemas entre los más comunes se encuentran: el tiempo que pierde un automovilista en trasladarse de un punto a otro, mayores índices de contaminación, fatiga e incluso estrés en los automovilistas (Lozano, Torres, & Antún, 2003).

Lo que se pretende en esta investigación es proporcionar una herramienta para estudiar la congestión vehicular de cruces principales en el Estado de México. Esto será realizado implementando un SMA que permita estudiar el tráfico vehicular. El SMA se representará como una forma simplificada de la realidad a través de una simulación. Cada uno de los elementos de la simulación serán agentes autónomos, capaces de tomar decisiones las cuales permitirán experimentar con el sistema y tomar las mejores estrategias para reducir el problema.

1.1 Antecedentes

Antes de que existieran las normas y reglamentos de circulación vial y de comportamiento de peatones, los usuarios de las carreteras, calles, cruces, entre más, utilizaban el sentido común para desplazarse sobre ellas. Es decir, de manera muy simple y poco elaborada, los conductores y peatones tenían que observar a su alrededor, de modo que pudieran seguir avanzando y al mismo tiempo evitar una colisión o accidente. No obstante, en el caso de los cruces, si un conductor había entrado o llegado primero a la intersección tenía el derecho de pasar primero, lo cual estaba aceptado, aunque no necesariamente establecido bajo la ley. Con el paso de los años, esto fue mejorando al establecerse las primeras normas y reglamentos de circulación vial urbanos, así como al ir recurriendo al uso de herramientas tales como los semáforos y señalamientos para darles el paso a unos conductores y/o peatones e impedirles el mismo a otros.

Hoy en día, el número de automóviles o vehículos de transporte que circulan en las vialidades es cada vez mayor y aunque existan normas, reglamentos, señalamientos y semáforos, los problemas de tráfico vial y mal comportamiento peatonal siguen empeorando y van de manera constante en aumento. De esta perspectiva, aunque se vayan tomando ciertas medidas como aumentar o disminuir el límite de velocidad en las vialidades, no es posible atender y aliviar de manera satisfactoria los problemas de mala circulación y congestión del tráfico, ya que en ocasiones pueden ser estas medidas las que sean detonantes de más problemas e incluso graves accidentes que han resultado en la pérdida de un número considerable de vidas humanas, o bien, de daños materiales o ambientales en el entorno circundante.

Desde la parte de los peatones, es peligroso para ellos cruzar una vialidad que no cuente con zonas de paso (puentes o túneles), o bien, con semáforos para tal efecto. Al respecto, la mala planeación, ubicación y distribución de los mismos ha demostrado en la práctica que se han provocado el aumento de los índices de tráfico vial. Por citar un ejemplo, los retrasos en la circulación vial se han debido a ello. Esto se puede mejorar al considerar el número de paradas mínimas, retardos mínimos, máxima capacidad y máxima seguridad, lo cual beneficia a ambos, al peatón y al conductor (Gobierno de Jalisco, 2017).

1.2. Planteamiento del problema

En las últimas décadas, se ha presentado un crecimiento geográfico y poblacional en las grandes ciudades y zonas metropolitanas debido a que son los principales centros de actividades económicas, lo que provoca que la población tienda a desplazarse a estas zonas. Tal concentración de personas requiere transporte público o privado para moverse de un punto a otro dentro de estas zonas. Esto ha provocado altos índices de motorización y la expansión de la infraestructura vial. Muchas de las principales vialidades en estas zonas, como lo es la Zona Metropolitana del Valle de México, antes de su construcción no fueron planeadas ni estudiadas, tomando en cuenta el crecimiento geográfico y poblacional y es en la actualidad donde se están presentando distintos problemas entre los cuales destaca el tráfico vehicular.

En el mundo, la cantidad de habitantes y de automóviles por habitante se ha elevado, por lo que las ciudades y grandes zonas metropolitanas se encuentran en una situación crítica en cuestión de congestión vehicular, principalmente en las horas pico por los turnos de la mañana, tarde y noche. Sin embargo, si este tipo de crecimiento poblacional y automovilístico sigue en aumento, el lapso de tiempo de estas horas picos se incrementará cada vez más sobre las vialidades principales de estos lugares. Las congestiones de estas someten a sus habitantes a tiempos excesivos de viaje, mayor contaminación, un entorno hostil donde la mayoría de los conductores se encuentran

estresados, ruido e invasión de la tranquilidad en ciertas áreas y una ciudad donde las personas corren el riesgo de vivir un accidente vial.

El congestionamiento vehicular producido en un momento y lugar determinado como lo son los cruceros principales, es el resultado de una serie de decisiones individuales tomadas por cada usuario de la infraestructura vial. Cada usuario decide cómo y cuándo recorrer lo que considera la mejor ruta para llegar a su destino. Su decisión puede basarse en criterios tales como: costo, tiempo, seguridad y comodidad. Además del tipo de transporte que va a utilizar ya sea automóvil particular o transporte público.

La congestión vial en cruceros de las principales carreteras de las ciudades y zonas metropolitanas es provocada por diferentes factores como lo son: la mala planeación y estudio de la infraestructura vial, el tiempo que tarda un semáforo en cambiar de estado, el cruce de peatones en esta zona, la falta de educación vial de los conductores ya que la mayoría no respetan los reglamentos viales.

Lo que se pretende en esta investigación es estudiar los principales factores que originan la congestión vehicular en los cruceros del Estado de México, para poder llevar a cabo un correcto análisis, modelado y simulación de un escenario mediante el uso de un SMA, que permita comprender el por qué se origina el tráfico vehicular para probar alternativas o estrategias que contribuyan a su control y reducción. Las entidades a emplear serán agentes autónomos e inteligentes que representarán vehículos, semáforos, entre más, capaces de tomar decisiones, los cuales permitirán experimentar con el SMA para evaluar y tomar decisiones que apoyen en reducir el problema.

Tomando en cuenta que los efectos y problemas que derivan del tráfico vehicular se encuentran en constante crecimiento, en este proyecto de investigación se propondrán soluciones y alternativas probadas en un escenario virtual, que de ser llevadas a cabo en la vida real contribuirían a minimizarlos. Este escenario virtual comprende el modelado del cruce vial denominado "Puerto de Chivos" el cual se encuentra entre los límites de los municipios de Nicolás Romero y Atizapán de Zaragoza en el Estado de México.

1.3. Objetivos

Al finalizar este proyecto de investigación, se buscará cumplir de manera satisfactoria con los siguientes objetivos.

1.3.1 Objetivo general

Evaluar estrategias eficaces para el control y reducción del tráfico vehicular en cruceros del Estado de México, mediante el análisis, modelado y simulación virtual de un escenario real basado en un sistema multiagente para el cruce vial denominado "Puerto de Chivos".

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar los principales factores que originan el tráfico vehicular en los cruceros del Estado de México.
- Modelar un escenario virtual que refleje los principales factores que se encuentran presentes en el tráfico vehicular del cruce vial denominado "Puerto de Chivos".
- Simular situaciones de tráfico vehicular en la vida real en el cruce vial denominado "Puerto de Chivos".
- Evaluar estrategias que de ser llevadas a cabo en la vida real contribuyan al control y reducción del tráfico vehicular en cruceros del Estado de México.

1.4. Delimitación o alcances de la investigación

Este trabajo de investigación estará delimitado específicamente para la zona que comprende el cruce urbano vial o vehicular con nombre "Puerto de Chivos" que se encuentra en la frontera de los municipios de Atizapán de Zaragoza y Nicolás Romero en el Estado de México. Se pretende evaluar y proponer mejoras en la vialidad del cruce, simulando diferentes situaciones, para que se evalúen diversas estrategias y se pueda defender cuál de ellas permite una mayor tasa de servicio, mejorando la movilidad del tráfico vehicular en dicho cruce. Esto con el fin de reducir el tamaño de las colas de espera de conductores, lo cual generará una disminución en los tiempos de desplazamiento. Estas estrategias contemplan únicamente el experimentar con los tiempos de los semáforos y manejar horas pico de congestión vehicular, dejando de lado para un trabajo futuro lo siguiente: contemplar accidentes, proponer mejoras de la infraestructura vial como lo son la creación de un paso elevado para desahogar y mejorar el tránsito en el paso a desnivel existente.

1.5. Hipótesis

Mediante el escenario virtual que será implementado en este trabajo de tesis, se demostrará que es posible simular un escenario real de un cruce urbano vial o vehicular en donde se plasme de manera realista la dinámica del tráfico vehicular mediante una simulación basada en un SMA. Este escenario tendrá aplicabilidad en un trabajo futuro para simular estrategias encaminadas a controlar y reducir el tráfico vehicular en cruceros urbanos, lo cual impactará de manera positiva en la calidad de vida de las personas que por ahí transitan. Dichas estrategias de simulación demostrarán su

eficacia y pertinencia, de forma que si son implementadas en la vida real, ayuden a minimizar los efectos y problemas derivados del tráfico vehicular.

1.6. Justificación

Actualmente, para que se vea reflejada una de las tantas maneras de contribuir a mejorar la calidad de vida de quienes habitan en las grandes zonas urbanas altamente pobladas, es muy importante que se generen nuevos programas, planes y estrategias encaminados con contribuir en agilizar el flujo vehicular y a mejorar el comportamiento peatonal en las distintas vialidades urbanas, en especial, en aquellas que ya existen, pero por otra parte, en prever y anticipar que se presenten problemas de consideración en las nuevas que se vayan habilitando, o bien, en las que se esté planeando construir o mejorar.

Mediante el buen uso y aprovechamiento de las ciencias computacionales (CC), en específico, en las áreas de la IA y realidad virtual (RV), se puede contribuir mediante estrategias de simulación 2D/3D basadas en un SMA, en proponer estrategias de reducción y control del tráfico vehicular en cruces de zonas urbanas densamente pobladas del Estado de México. Estas estrategias serán derivadas del análisis que se realice, al llevar a cabo simulaciones a diversas escalas, desde un simple cruce vial hasta un complejo nodo vial que conecte diversas avenidas con pasos elevados y a desnivel, las cuales demuestren que toda mejora que se proponga tenga un impacto positivo y buena eficacia en la vida real.

1.7. Fundamentación inicial

Los SMA constituyen un área de creciente interés dentro de la IA, debido a la capacidad de adaptación para resolver problemas sociales complejos no resueltos de manera satisfactoria mediante otras técnicas. Un agente es cualquier cosa capaz de percibir su medio ambiente mediante sensores y actuar en éste, a través de actuadores. Todo agente tiene una función u objetivo. Un agente inteligente o autónomo es una entidad con una sofisticada estructura interna y una conducta flexible e independiente que se puede calificar como inteligente. La inteligencia va asociada con las acciones que un agente debe tomar para cumplir sus objetivos y la capacidad que tiene para interactuar con otros.

1.7.1 Naturaleza del ambiente de los agentes

La naturaleza dentro del ciclo de percepción-decisión-acción de los agentes dentro su ambiente es a partir de lo siguiente:

- Inicialmente, perciben su ambiente mediante “sensores”.
- Tienen un particular “estado interno” que les permite recordar y relacionar lo percibido con ideas preconcebidas o conocimientos adquiridos.

- Finalmente, toman una decisión y “actúan” sobre el ambiente, por medio de “efectores” (acciones).
- Sus actuaciones están basadas en sus “metas” u objetivos.
- En función de los objetivos toman la “decisión” más adecuada, dependiendo del conjunto de percepciones del ambiente.

1.7.2 Características y/o propiedades

Los agentes inteligentes están definidos por distintos elementos encargados de darle una distinción a cada uno de ellos, los cuales se explican como sigue:

1.7.2.1 Autonomía

Los agentes deben ser capaces de llevar a cabo la mayor parte de la solución a su problema sin la intervención directa de los seres humanos o de otros agentes, teniendo alguna clase de control sobre sus acciones y su estado interno.

1.7.2.2 Iniciativa

Los agentes tienen que tener un carácter emprendedor y toman la iniciativa para actuar guiados por los objetivos que deben satisfacer. En cada momento el agente decide qué acción llevar a cabo. No sólo actúa en función de los estímulos que percibe, sino que realiza acciones como resultado de sus decisiones.

1.7.2.3 Sociabilidad

Los agentes deben ser capaces de interactuar, cuando lo consideren apropiado, con otros agentes y con los seres humanos con el fin de completar su propia resolución de problemas y para ayudar a otros con sus actividades en su caso.

1.7.2.4 Funciones

Un agente inteligente se puede considerar para llevar a cabo distintas funciones entre las cuales están: la ejecución de tareas, en donde la destreza que tiene el agente para lograr uno o varios objetivos, es la capacidad de realizar tareas; el conocimiento de su entorno, el cual debe de ser introducido o construido por el desarrollador; y la capacidad de comunicación, en donde se distinguen dos tipos de comunicación de las cuales la primera es la interacción con el usuario y la segunda es la comunicación inter-agente.

1.7.3 Tipos de agentes

Los agentes según su naturaleza y grado de complejidad pueden ser de varios tipos, los cuales se describen a continuación:

1.7.3.1 Agente simple

Este tipo de agente selecciona sus acciones dependiendo de la percepción actual, ignorando el resto del historial de percepciones. El que este tipo de agente sea simple no indica que sólo se presentará en entornos simples, pues las conductas simples ocurren incluso en los entornos más complejos. En este tipo de agentes se desencadena algún tipo de conexión establecida en el programa del agente en donde alguna forma de procesamiento se realiza sobre la información visual.

1.7.3.2 Agente basado en modelos

Este tipo de agente tiene mejor visibilidad que el agente simple puesto que tiene un estado interno que depende del historial de percepción y por lo tanto refleja al menos algunos de los aspectos observados de la situación actual.

1.7.3.3 Agente basado en objetos

En este tipo de agentes el saber algo sobre el estado actual del entorno no siempre es suficiente para decidir qué hacer y por ello la decisión tomada depende de los objetivos que persiga, es decir, que el agente además de necesitar una descripción del estado actual, necesita algún tipo de información respecto a los objetivos que se persiguen.

1.7.3.4 Agente basado en utilidad

Para este tipo de agente los objetivos por sí solos no son suficientes para generar un comportamiento de alta calidad en la mayoría de los entornos, pero si proporcionan una distinción binaria sobre si el agente esta "feliz" o "infeliz".

1.7.3.5 Agente de aprendizaje

El aprendizaje es ahora el método preferido para la creación de sistemas de estado del arte. Este tiene como ventaja el permitir al agente operar en entornos inicialmente desconocidos para así mejorar su conocimiento.

1.7.4 Clasificación de entornos para agentes

El entorno, es uno de los primeros componentes que se deben de tomar en cuenta al momento de la modelación de un agente, ya que en gran medida determina el diseño apropiado del agente, pues

es sobre el cual se sitúan los agentes, además representa al conjunto de problemas a los cuales la existencia de los agentes pretende dar solución. Los entornos se agrupan de la siguiente manera:

1.7.4.1 Por su capacidad de observación

1.7.4.1.1 Parcialmente observables

Este tipo de entorno puede darse debido a que un agente no cuente con los suficientes sensores para detectar todo su entorno o debido a que los sensores de los agentes pueden ser inexactos presentando deficiencias como la poca capacidad de detección.

1.7.4.1.2 Totalmente observables

En este tipo de entorno los agentes tienen distintas características entre ellas el que los sensores del agente permiten el acceso al estado completo del entorno; también se detectan todos los aspectos relevantes para la toma de decisiones del agente; para términos de rendimiento son los más recomendables y convenientes pues el agente no necesita mantener ningún estado interno al realizar un seguimiento del mundo.

1.7.4.2 Por la determinación del siguiente estado

1.7.4.2.1 Entornos deterministas

En este tipo de entorno se determina completamente el siguiente estado desde el estado actual y la acción ejecutada por el agente el cual, en principio, no tiene que preocuparse por la incertidumbre (la cual surge sólo a partir de las acciones de otros agentes) en un entorno completamente observable. Si el entorno es parcialmente observable entonces podría parecer estocástico.

1.7.4.2.2 Entornos estocásticos

Son también llamados no deterministas debido a que es lo contrario a los deterministas. Estos entornos son parcialmente observables lo que generalmente implica la incertidumbre sobre los posibles resultados que se obtendrán de las acciones. Las descripciones de entornos no deterministas son asociadas generalmente con medidas de desempeño, las cuales requieren que el agente tenga éxito para todos los posibles resultados de sus acciones.

1.7.4.3 Con base en la experiencia del agente

1.7.4.3.1 Entorno episódico

En este tipo de entorno la experiencia del agente se divide en episodios atómicos, es decir en cada episodio, el agente recibe una percepción y después realiza una sola acción; el siguiente episodio no depende de las acciones realizadas en episodios anteriores.

1.7.4.3.2 Entorno secuencial

En este tipo de entorno las decisiones y acciones actuales pueden afectar a las decisiones y acciones futuras, por ello se dice que las acciones a corto plazo pueden tener consecuencias a largo plazo; este tipo de entorno es más complejo que el episódico ya que el agente debe pensar en el futuro.

1.7.4.4 Según la dinámica del entorno

1.7.4.4.1 Estático

Este tipo de entorno no puede cambiar mientras el agente está tomando una decisión, así mismo los entornos de este tipo son fáciles de tratar puesto que no es necesario estar pendiente de los cambios que se puedan estar sucediendo ni tampoco interesa analizar el paso del tiempo.

1.7.4.4.2 Dinámico

Este tipo de entorno puede cambiar mientras el agente toma sus decisiones; pide continuamente al agente lo que quiere hacer si aún no se ha decidido cuenta como decisión de no hacer nada.

1.7.5 Sistemas Multi-Agente (SMA)

Los SMA son varios agentes interactuando en el mismo entorno. En un SMA el conjunto de agentes está sometido continuamente a cambios locales. Estos cambios se diseñan mediante reglas de comportamiento, cuyos resultados están influenciados por el comportamiento del resto de agentes. En estos sistemas las acciones de un agente influyen las acciones del resto y por ello pueden experimentar aprendizaje, adaptación y reproducción.

1.8. Metodología

Actualmente, los SMA constituyen un área de creciente interés dentro de la IA, debido a la capacidad de adaptación para resolver problemas complejos no resueltos de manera satisfactoria mediante otras técnicas. Uno de los problemas en las grandes áreas urbanas, como lo es la Zona Metropolitana del Valle de México, es la congestión vehicular que se presenta en los principales cruces en ciertas horas del día. Esto trae consigo un sin número de problemas entre los más

comunes se encuentran: el tiempo que pierde un automovilista en trasladarse de un punto a otro, mayores índices de contaminación, fatiga e incluso estrés en los automovilistas.

1.8.1 Propuesta

En este proyecto de investigación, se hará uso de una herramienta de simulación de Sistemas Multiagente, la plataforma AnyLogic (Grigoryev, 2012). En esta plataforma se modelará, ejecutará y validará es un escenario virtual el caso del cruce vehicular mencionado en la sección 1.4, mismo que mostrará de manera confiable la dinámica del tráfico vehicular que en él ocurre. Este escenario se pretende será utilizado en un trabajo futuro para que a partir de los resultados obtenidos se puedan proponer mecanismos de acción para atacar, controlar y reducir los problemas de tráfico vehicular en las grandes áreas urbanas del Estado de México. De manera concisa, lo que se pretende en esta investigación es proporcionar un escenario virtual para estudiar la congestión vehicular de cruces principales en el Estado de México. Esto será realizado implementando un SMA que permita estudiar el tráfico vehicular. El SMA se representará como una forma simplificada de la realidad del cruce vehicular a través de una simulación. Cada uno de los elementos de la simulación serán agentes autónomos, capaces de tomar decisiones, los cuales permitirán experimentar con el sistema y tomar las mejores decisiones para reducir el problema.

Dado lo anterior, la simulación tomará lugar al generar el escenario virtual y los agentes que en él intervienen, permitiendo que estos tomen acciones para que cumplan una meta particular en función de los estímulos que estos reciban de su entorno. Por lo que dicha simulación, podrá ser analizada desde una interfaz gráfica en 2D/3D, donde valores numéricos serán recopilados para su análisis posterior en un trabajo futuro. Cabe mencionar que dicha simulación será analizada, modelada y ejecutada en la plataforma de simulación AnyLogic. Esta plataforma ofrece como recursos para los desarrolladores, conjuntos de elementos 3D y 2D, así como bibliotecas de funciones y paquetes de clases, en este sentido, la programación de los algoritmos necesarios para el caso de estudio queda por cuenta de los autores de este trabajo, lo cual no será una tarea trivial que será llevada a cabo en el lenguaje Java que es soportado por la mencionada plataforma de simulación.

1.8.2 Vista general de la propuesta a desarrollar

La figura 1.1 muestra un diagrama que plasma la propuesta de lo que a futuro se pretende desarrollar. Aunque para efectos de esta tesis o trabajo de investigación lo que va a ser desarrollado cubrirá una parcialidad suficiente para poder modelar un escenario real de manera virtual (recordar lo dicho en la sección 1.4). La primera parte a considerar en la generación de un escenario virtual complejo y completo es la creación de varios módulos (generador de facilidades urbanas, de contingencias y comportamiento vehicular, ente otros) que dictarán el comportamiento general de la simulación. El módulo generador de facilidades urbanas estará a cargo de generar semáforos en los

cruceros, las calles y avenidas, así como pendientes y otros aspectos relacionados. En su contraparte, el módulo generador contingencias permitirá suministrar manifestaciones, desastres, variantes climatológicas, etc. Además, se contará con un módulo de generador de agentes el cual a su vez dependerá del módulo generador del comportamiento vehicular para determinar el comportamiento entre ellos y su entorno.

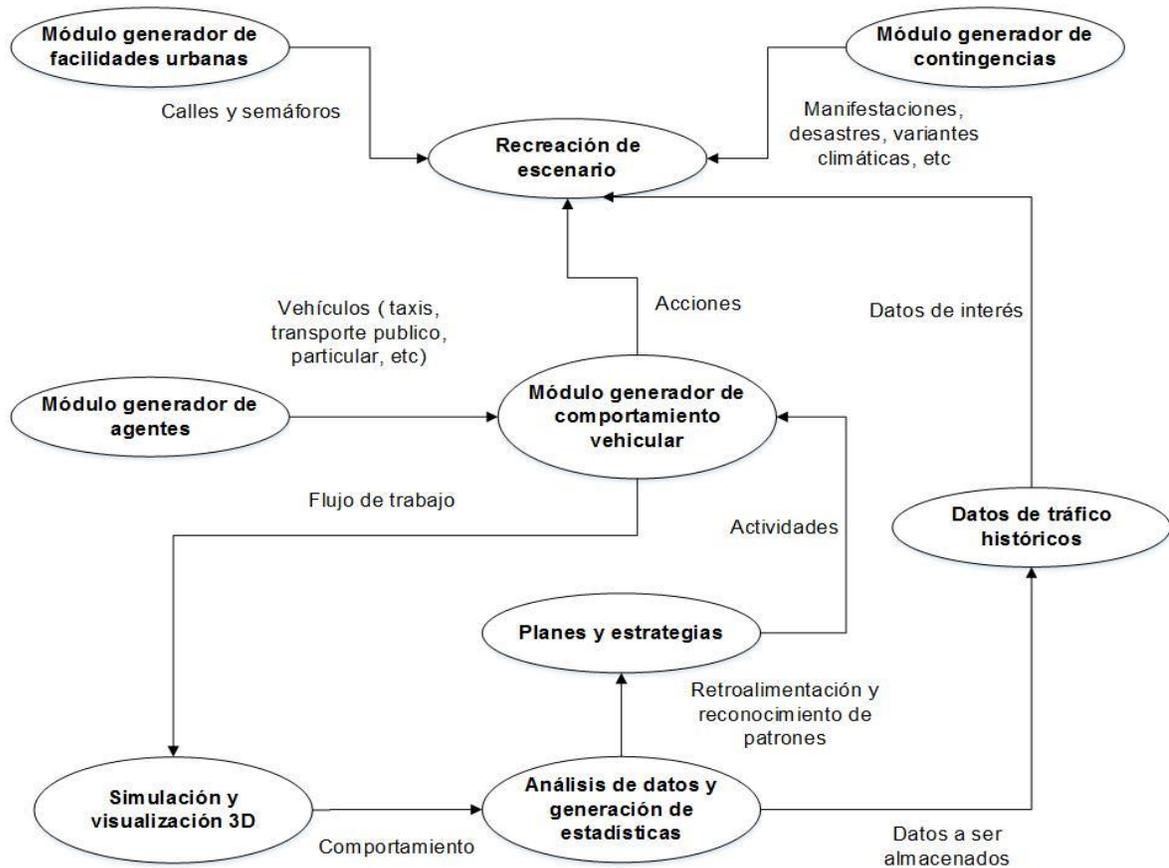


Figura 1.1 Diagrama general de la propuesta a desarrollar

1.8.3 Diagramas de secuencia

Para una mejor comprensión de la funcionalidad que tendrán los agentes en las simulaciones que serán llevadas a cabo, se presentan los siguientes diagramas de secuencia.

1.8.3.1 Acciones generales

De manera general, un automóvil decide su ruta, la sigue o bien replantea. De manera concurrente o asíncrona recibe notificaciones de las acciones que realizan sus vecinos y las procesa. La secuencia de estas actividades se muestra en la figura 1.2.

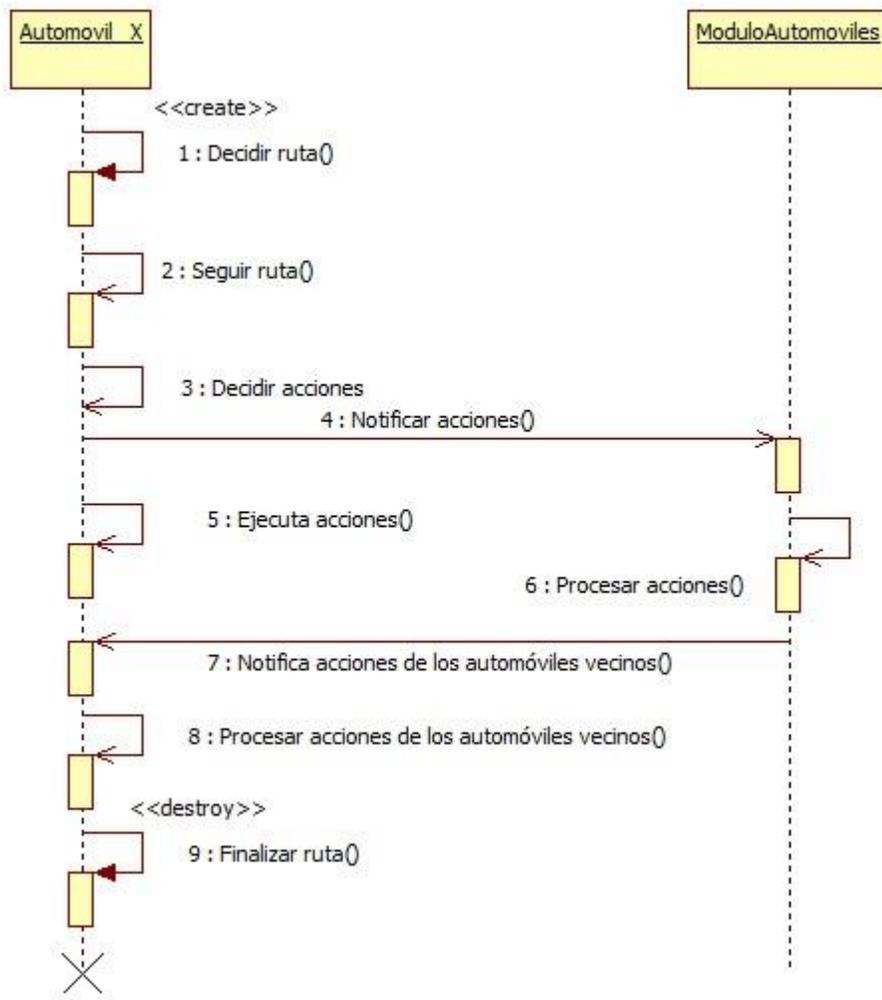


Figura 1.2 Acciones generales de un automóvil

1.8.3.2 Incrementar y disminuir velocidad

En la figura 1.3, se muestra que un automóvil puede incrementar o disminuir su velocidad, manteniendo notificado al módulo de automóviles, el cual las procesa.

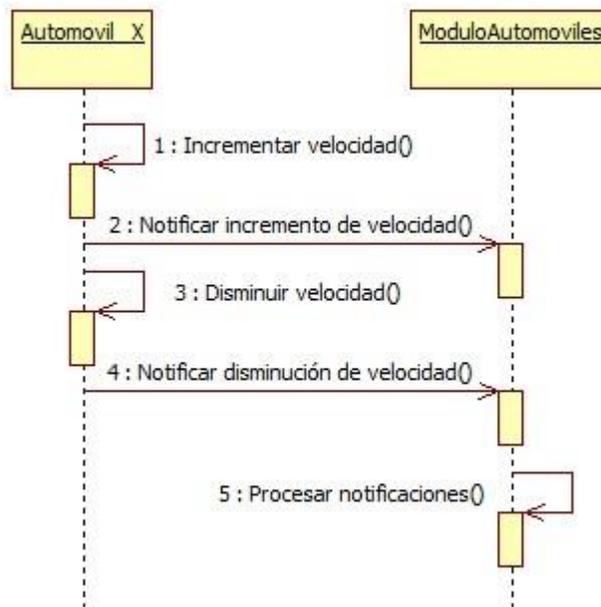


Figura 1.3 Incremento y disminución de velocidad de un automóvil

1.8.3.3 Cambio de carril hacia la izquierda o derecha

Cuando un automóvil enciende su luz direccional, con la intención de cambiar de carril, debe notificar al módulo de automóviles. El automóvil cesa o realiza el cambio de carril y notifica su decisión al módulo de automóviles, el cual la procesa (ver figura 1.4).

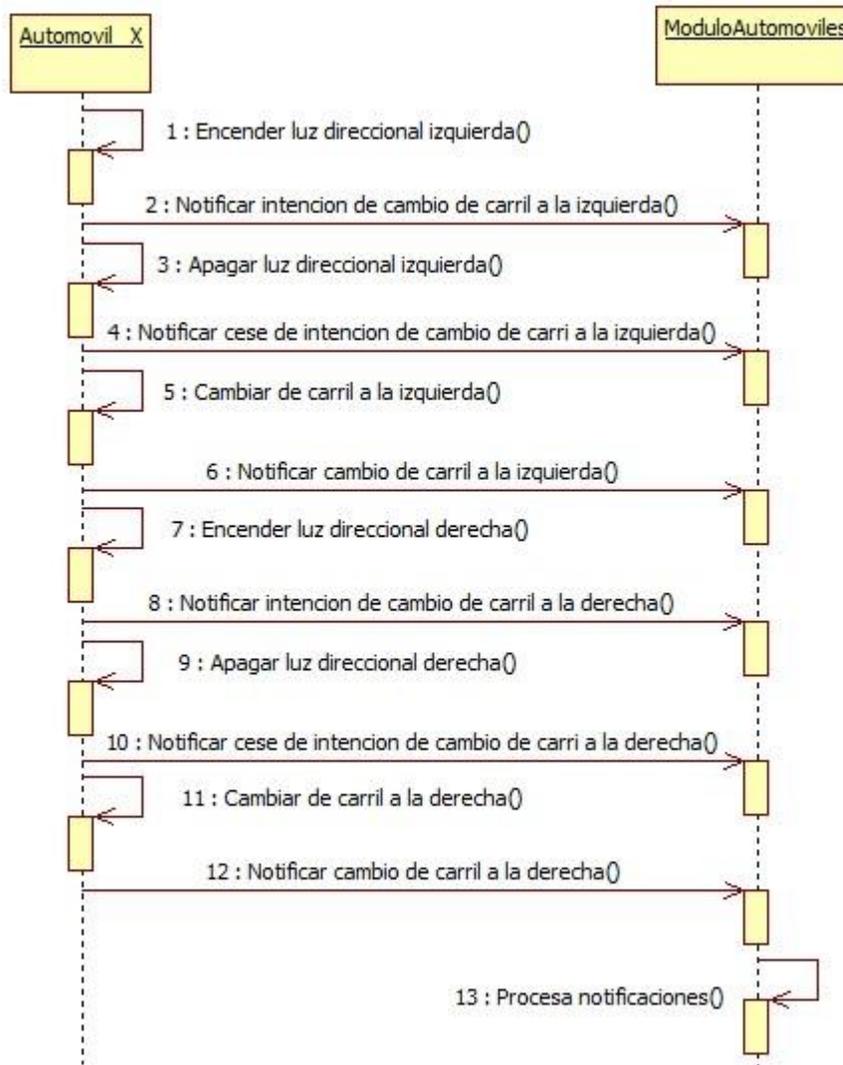


Figura 1.4 Cambio de carril hacia la izquierda o derecha de un automóvil

1.8.3.4 Dar vuelta hacia la izquierda o derecha

En la figura 1.5 se muestra el proceso de dar vuelta. Un automóvil notifica al módulo de automóviles la intención que tiene de dar vuelta hacia la izquierda o derecha. El automóvil toma la decisión de cese de dar vuelta o dar vuelta y notifica al módulo la decisión que tomo para que este la procese.

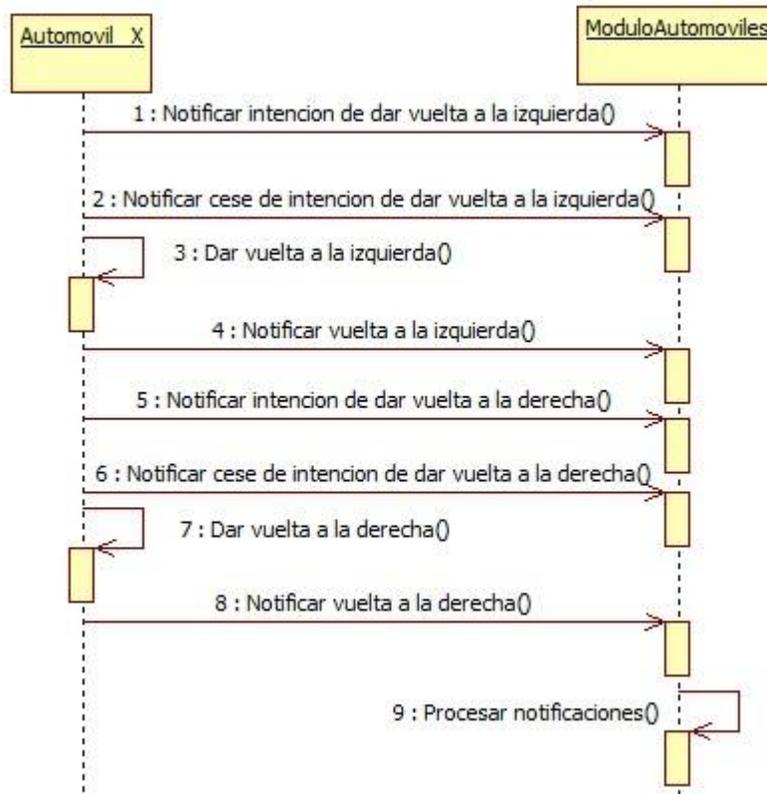


Figura 1.5 Vuelta hacia la izquierda o derecha de un automóvil

1.8.3.5 Chocar

En caso de un choque, el automóvil debe notificarlo al módulo de automóviles para su procesamiento. Esto se muestra en la figura 1.6

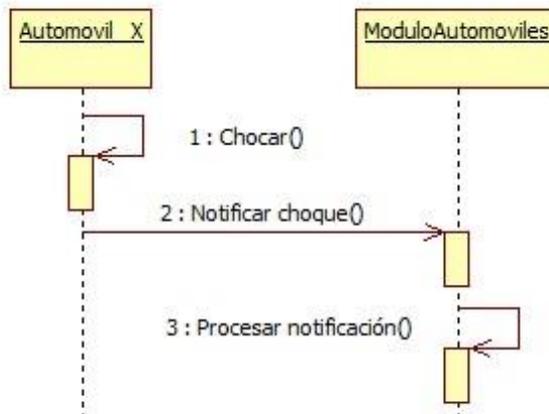


Figura 1.6 Choque de un automóvil

1.8.3.6 Tocar claxon

Cuando un automóvil toca el claxon es para dar una alerta ante alguna acción que otro automóvil realiza. De igual manera a las anteriores decisiones, debe ser procesada previa notificación al módulo de automóviles (ver figura 1.7).

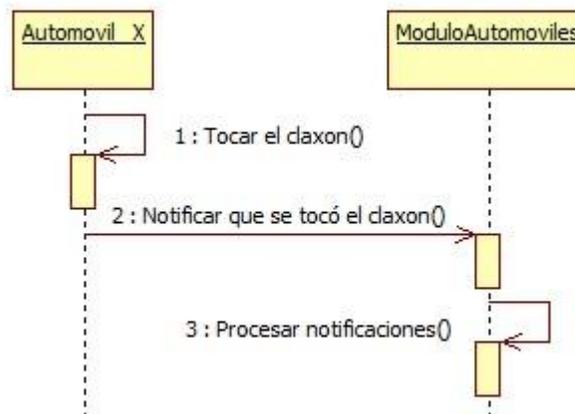


Figura 1.7 Toque de claxon de un automóvil

1.8.3.7 Encender y apagar luces frontales

En la figura 1.8, se muestra que si un automóvil enciende o apaga sus luces frontales es para solicitar que un automóvil vecino le ceda o no el paso. Como toda decisión o acción tomada o ejercida, esta debe ser notificada al módulo de automóviles quien la debe procesar.

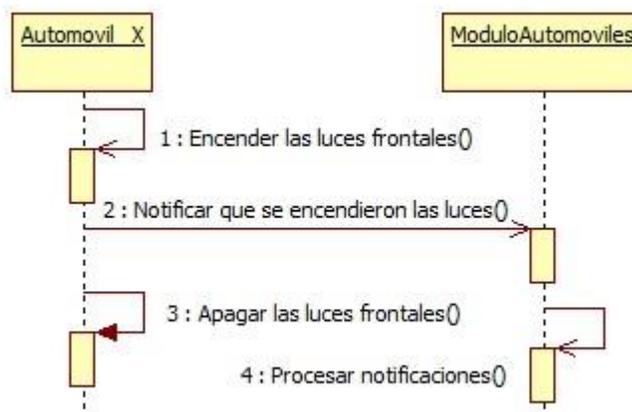


Figura 1.8 Encender y apagar luces frontales de un automóvil

1.8.3.8 Detenerse

La secuencia para que un automóvil se detenga inicia en el momento en que este enciende sus luces direccionales, pero puede ser cesada cuando decide no detenerse. Sin importar si se detuvo o no, el módulo de automóviles debe enterarse mediante una notificación para que esta sea procesada. Dicha secuencia es plasmada en la figura 1.9

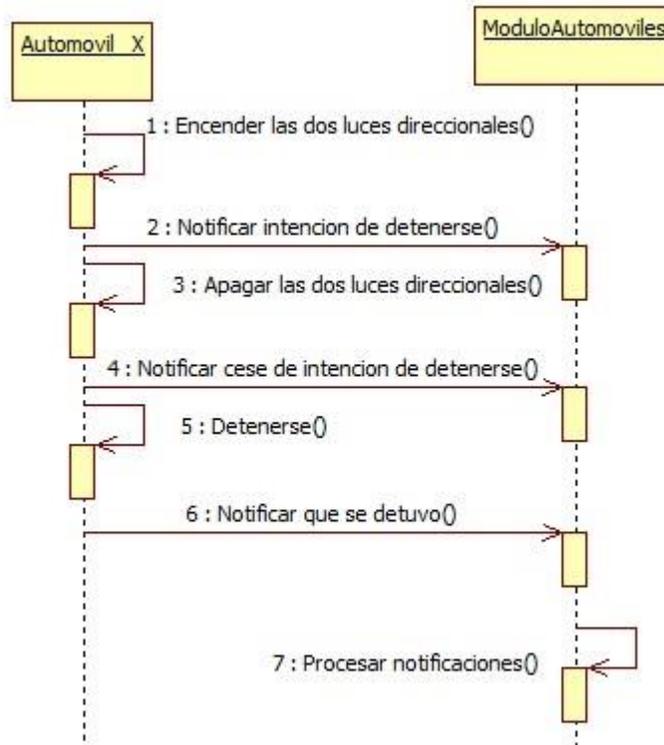


Figura 1.9 Secuencia para que un automóvil se detenga

1.8.3.9 Acciones generales con módulo de semáforos

En la figura 1.10, se puede observar que, de manera general, un automóvil decide su ruta, la sigue o replantea. El módulo de automóviles notifica al automóvil de la luz actual de los semáforos vecinos para que con base en su procesamiento este último decida y notifique sobre las acciones que decida mismas que deben ser procesadas por el primero.

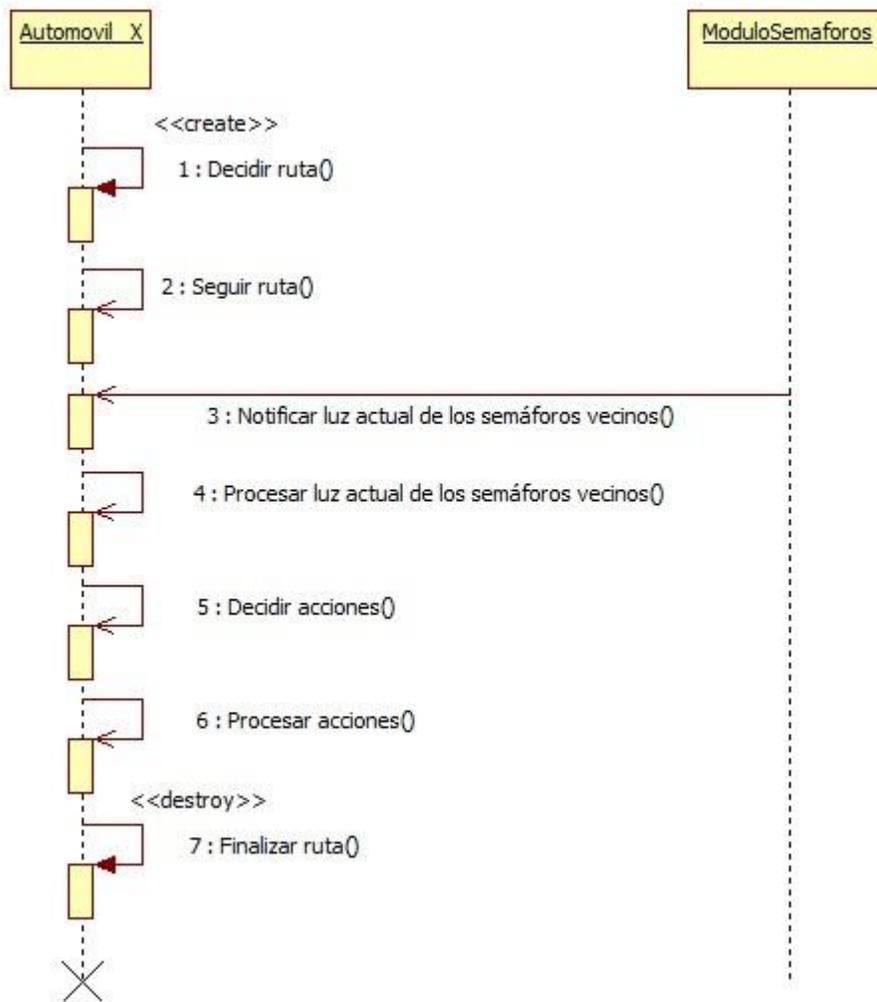


Figura 1.10 Acciones generales con módulo de semáforos

Capítulo 2 Fundamentos de modelado y simulación en la dinámica urbana del tráfico vehicular

2.1 Introducción

Partiendo del punto de vista que para la interpretación de las interacciones existentes en un sistema urbano como lo es el tráfico vehicular, se requiere de una descripción detallada de los actores involucrados, lo cual implica que se tomen en consideración sus relaciones entre sí y la manera en que actúan en su entorno.

Ante la responsabilidad de crear un sistema de simulación, como lo es para el tráfico vehicular, se deben evaluar y decidir las acciones que ejecutará el sistema. Esta decisión debe reflejar que la conducta resultante del sistema satisfaga de una manera conveniente y eficaz, aunque no necesariamente de manera óptima, los objetivos planteados en su construcción a partir de su análisis y modelado (Tarifa, 2001).

Mediante una opción de experimentación en el contexto de un sistema real, se pueden obtener indicadores para una buena evaluación y correcta decisión, estos indicadores dictarán la pauta para saber qué acciones dará como respuesta el sistema ante una determinada situación. No obstante, existen ciertos factores, entre ellos costos (demasiados recursos) y seguridad (posible pérdida de vidas o afectación a la integridad de personas) que pueden provocar inconvenientes y hacer que esta opción no sea viable. Para poder librar estos inconvenientes, lo que más conviene es hacer un reemplazo del sistema real por otro sistema, aunque la mayor parte de las veces se obtenga una versión simplificada. A partir de este último sistema, se logra obtener al menos un modelo que será utilizado para conducir experimentos sin padecer de inconvenientes como los citados aquí.

La simulación hoy en día es empleada debido a que permite de manera poco o mínimamente invasiva el experimentar con todo modelo propuesto. Sin embargo, no toda simulación es buena, pero puede serlo si se logra diseñar un pertinente plan de experimentación que conduzca a la adopción de buenas decisiones mediante la optimización. Además, todo plan de experimentación permite aprender a conducir el sistema, mediante entrenamiento o capacitación.

2.2 Conceptos básicos

A la hora de crear sistemas o proyectos complejos como lo es para el entendimiento y mejora de la dinámica del tráfico vehicular, se requiere para su construcción el llevar a cabo estudios de análisis,

aplicando técnicas de modelado y simulación. Mediante estas técnicas se obtienen pautas del cómo ciertas decisiones y estrategias confiables puedan ser aplicadas a un modelo o sistema real.

En esta sección se destacan los siguientes conceptos básicos fundamentales:

2.2.1 Sistema

Como lista y cita (Tapias, s.f.), pueden darse varias definiciones de sistema, algunas son las siguientes:

- "Conjunto de elementos cuya interacción interesa estudiar".
- "Conjunto de partes organizado funcionalmente de manera tal de constituir una unidad interconectada".
- "Totalidad arbitraria de variables que el investigador escoge de un gran número de variables que pertenecen al sistema real".
- "Un sistema puede ser definido como una reunión de componentes dotados de propiedades identificables y entre los cuales se perciben relaciones. El exterior de un sistema es su contorno".

Una definición más clara la dan (Peláez & Mejía, 2000): "Un Sistema es una interconexión de componentes que realizan uno o varios objetivos determinados".

De las definiciones expuestas, se destaca que en todo sistema hay un conjunto de elementos relacionados y son estos los que dictan su comportamiento y alcances.

En el contexto de teoría de sistemas, un sistema puede ser definido como una porción de la realidad cuya evolución en el tiempo puede ser descrita por un cierto número de atributos medibles. Un atributo medible es una característica que puede ser correlacionada con uno o más números que pueden ser enteros reales o complejos o simplemente un conjunto de símbolos.

En los sistemas interesa por un lado sus relaciones funcionales internas, y por otro lado sus relaciones externas con el entorno, las cuales dictan su estructura del sistema y comportamiento, respectivamente. El comportamiento está relacionado con la dependencia de las respuestas a los estímulos. La estructura está relacionada con la organización entre los elementos del sistema y el comportamiento de estos. En algunos casos la distinción entre las causas y los efectos no es de fácil identificación.

Cuando es dada de antemano una separación de aquellas cantidades producidas por el entorno y las producidas por el sistema, se puede distinguir entre entradas y salidas, de manera respectiva. Dichos sistemas son llamados sistemas orientados o controlados. Si no se da una separación entre entradas y salidas, se habla de sistemas no orientados o neutrales.

La medición de los atributos del sistema introduce el problema de establecer relaciones cuantitativas entre ellos, es decir de construir modelos abstractos o matemáticos. Ya que los modelos matemáticos son asimismo sistemas, aunque abstractos, es de costumbre denotar a ambos, el objeto de estudio y su modelo matemático, como sistema. La teoría de sistemas consiste en la deducción de modelos matemáticos para los sistemas, su clasificación, la investigación de sus propiedades, y su uso para la solución de problemas de ingeniería.

2.2.2 Subsistema

Todo sistema de complejidad y tamaño considerable, puede ser subdividido en partes menores conocidas como subsistemas para ser estudiados de manera aislada. Con ello se puede decir que un subsistema puede ser visto como un subconjunto interconectado de elementos relacionados entre sí.

(Tapias, s.f.), resalta que para obtener el comportamiento del sistema total se debe considerar lo que sigue:

- A nivel particular, de cada subsistema evaluar su comportamiento.
- Las distintas relaciones e interconexiones dadas entre los subsistemas generados al subdividir al sistema total.
- Todas las relaciones con el entorno que rodea al sistema.

2.2.3 Modelo

Previo a la simulación de un sistema, se requiere de la existencia de uno o más modelos, es decir, la construcción de aquellos que representen al sistema. Toda simulación busca probar o refutar ciertas hipótesis para averiguar lo qué pasaría en el sistema si estas acontecieran, con lo cual, todo modelo construido representa una equivalencia en una versión simplificada de la realidad del sistema. No obstante, la creación de un buen modelo debe iniciar con el análisis de las variables que están presentes en el sistema, así como de las relaciones que existen entre ellas. De tal forma que el refinamiento del análisis dé un mayor entendimiento del sistema y los modelos generados sean más apegados a la realidad del sistema (Tapias, s.f.).

Lo anterior, se deduce a lo siguiente:

- Análisis: identificar y estudiar los hechos y fenómenos que derivan del sistema.
- Abstracción: interpretación de los hechos y de la realidad del sistema.
- Modelo válido: representación del sistema que contiene aquellos detalles de interés.
- Refinamiento: eliminar todo detalle que no interese o que complique al modelo final que sea tomado como válido.

En (Maldonado & Cruz Gómez, 2010), los autores definen en su glosario de términos a un modelo como: “una interpretación coherente o consistente, usualmente cerrada y eventualmente autorreferencial, del mundo, de la naturaleza o la sociedad o de una parte de ellos”.

Según se menciona en (Pelález & Mejía, 2000), se debe iniciar la modelación de un sistema con la identificación del problema, aceptando incluso aproximaciones teóricas o experimentales. Aunque el reporte de un modelo no pueda ser capaz de otorgar respuestas correctas, puede dar la documentación de errores ligados a aproximaciones anteriores. Todo problema debe ser expresado en su planteamiento de forma clara y sencilla, lo cual ayuda a simplificarlo en el modelo que lo representa, con base en las condiciones mínimas en las cuales el sistema opera teóricamente, dando el punto de partida para conducir una investigación del problema. Se debe tener cuidado de no caer en el error de construir un modelo sin fundamento, sólo por la razón equivocada de ver lo que suceda en la simulación.

En (Alonso Sarría & Palazón Ferrando, 2008), se dice que el modelado (modelización) resulta atractivo y útil en aquellas situaciones en las que sucede lo siguiente:

- Costo: puede resultar demasiado costoso realizar ensayos sobre sistemas reales.
- Daño: la destrucción puede ser un efecto derivado de los ensayos sobre los sistemas reales.
- Tiempo: distintas escalas de tiempo pueden ser alteradas y esto puede ser interesante.

Dadas dichas situaciones, el modelado es una herramienta de gran importancia para el desarrollo de la investigación científica. Por ejemplo: en un modelo matemático del funcionamiento de un sistema de control de semáforos para el control del tráfico vial, aspectos concretos del mismo son modelados mediante diversas ecuaciones, así una teoría, una hipótesis acerca del funcionamiento de algún aspecto serán representadas por ellas. Con ello, los modelos se convierten en herramientas de construcción que integran diferentes teorías científicas para el estudio de su correspondencia con la realidad, así como las interacciones de los actores y factores presentes.

Los objetivos de la construcción de un modelo (Alonso Sarría & Palazón Ferrando, 2008) son los siguientes:

1. Simulación: para explorar situaciones (escenarios) en las que no se cuenta con datos empíricos, interpolar entre medidas para estimar el valor de las variables y estimar su valor a partir de otras.
2. Predicción: extrapolar más allá del espacio-tiempo donde se tienen medidas.
3. Incremento del conocimiento: acerca del funcionamiento de los sistemas y acerca de cuáles son los parámetros, variables, relaciones, procesos, estructuras y escalas importantes.
4. Apoyo a la investigación científica: facilitando la integración multidisciplinar, proporcionando un laboratorio virtual y facilitando la comunicación de la investigación y sus resultados.

La asociación entre modelo y aproximación coloca el modelado en una zona intermedia, provocando que esta no pertenezca a la ciencia pura debido a la falta de postulados de unicidad, aunque en todo caso, cuenta con los resultados y metodologías ofrecidas por la ciencia abstracta de las matemáticas. La limitada capacidad de los modelos para resolver cualquier problema específico brinda la posibilidad de construir modelos orientados a la aplicación.

De manera formal, se consideran dos aproximaciones principales para la construcción de un modelo. Estas se basan en los dos tipos principales de información sobre el sistema en general, los cuales son:

- Conocimiento acerca del funcionamiento interno del sistema, denotado como componente de caja blanca.
- Datos experimentales de entradas y salidas del sistema, conocidos como componentes de caja negra.

2.2.4 Objeto

Toda entidad del mundo real es denotada como objeto, el cual puede exhibir comportamientos ampliamente distintos dependiendo del contexto en el que es estudiado, así como de los aspectos de su comportamiento bajo estudio.

Por una parte, un modelo base es una representación abstracta e hipotética de las propiedades de uno o más objetos, en particular de su comportamiento, la cual es válida en todos los contextos posibles, y describe todas las facetas de los objetos. Un modelo base es hipotético, en la práctica no se puede formular o representar tal modelo de manera total.

Por otro lado, un sistema es un objeto bien definido en el mundo real bajo las condiciones específicas, solamente considerando aspectos específicos de su estructura y comportamiento (ver Figura 2.1).

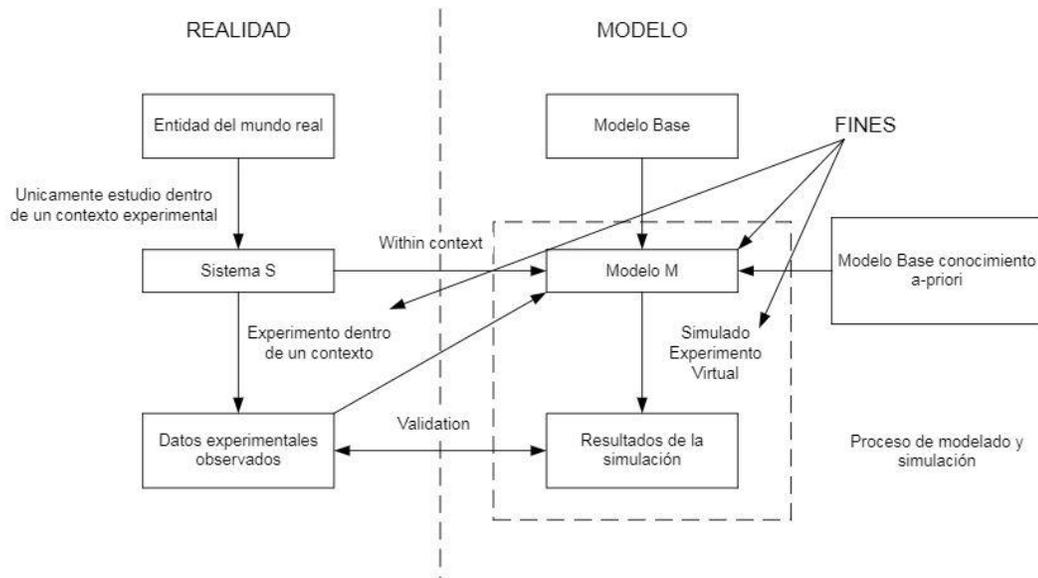


Figura 2.1 De la realidad a su representación parcial o total en un modelo

2.2.5 Marco experimental

Cuando se estudia un sistema del mundo real, el marco experimental, describe las condiciones experimentales (el contexto), aspectos, dentro de cuáles tal sistema y sus modelos correspondientes serán usados. Como tal, el marco experimental refleja los objetivos de quien lleva a cabo los experimentos sobre el sistema real o, a través de la simulación, sobre el modelo.

En su forma más básica (ver Figura 2.2), un marco experimental consta de dos juegos de variables, las variables de entrada y las variables de salida, las cuales coinciden con los terminales del sistema o el modelo.

Del lado de las variables de entrada, un generador describe las entradas o estímulos aplicados al sistema o al modelo durante el experimento. Un generador, por ejemplo, puede especificar un estímulo de escalón unitario. Del lado de las salidas, un transductor describe las transformaciones aplicadas a las salidas del sistema (experimento) o a los resultados del modelo (simulación) para obtener una interpretación significativa. Un transductor puede especificar por ejemplo el cálculo de los valores extremos de alguna de las variables. En lo anterior, salida se refiere a la salida del sistema físico así como también a las salidas sintetizadas en la forma de los estados del modelo interno medidos por un observador. En el caso de un modelo, las salidas pueden observar la información interna tal como las variables de estado o los parámetros.

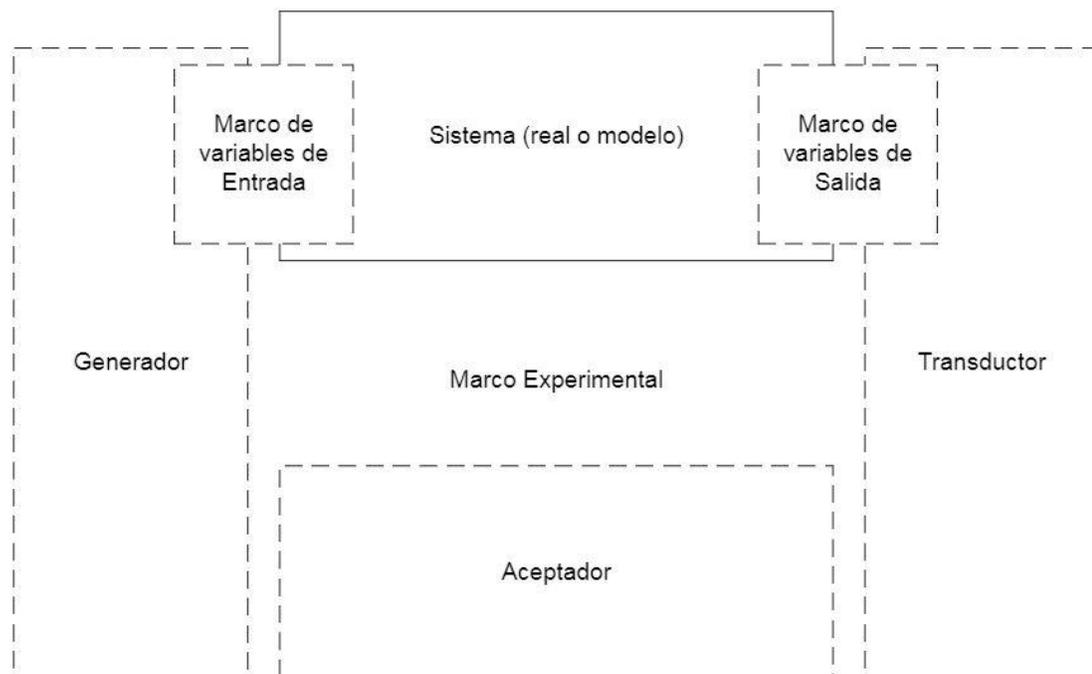


Figura 2.2 Comparación en un sistema y el marco experimental

Aparte de las variables de entrada/salida, un generador y un transductor, una Marco Experimental puede incluir también un aceptador que compara las características de las entradas del generador con las características de la salida del transductor, y determina si el sistema (real o el modelo) se adapta al marco experimental, y por consiguiente, a los objetivos del experimentador.

2.2.6 Experimentación

Al acto físico de llevar a cabo un experimento se le denomina experimentación. Un experimento puede o no interferir con el funcionamiento del sistema (influenciar sus entradas y parámetros). Como tal, en su propio derecho, el entorno de la experimentación puede verse como un sistema. También, la experimentación involucra la observación. La observación arroja las medidas.

2.2.7 Simulación

La predicción y anticipación son dos objetivos que se buscan con la simulación, es decir, se puede estimar y mostrar lo que puede suceder en un sistema real ante determinados cambios bajo determinadas condiciones y a su vez se puede prever cursos de acción. En (Tapias, s.f.), se dice que la simulación es empleada si no existe otra técnica que permita encontrar una solución a un problema de estudio, una técnica alternativa es mediante el análisis la cual se prefiere antes que simular. Ninguna de estas alternativas es mejor que la otra, son los campos de acción los que

determinan cuál debe emplearse. Un punto a favor de la simulación es que mediante esta ha sido posible estudiar problemas y darles solución, algo que de otra manera hubieran resultado inaccesibles.

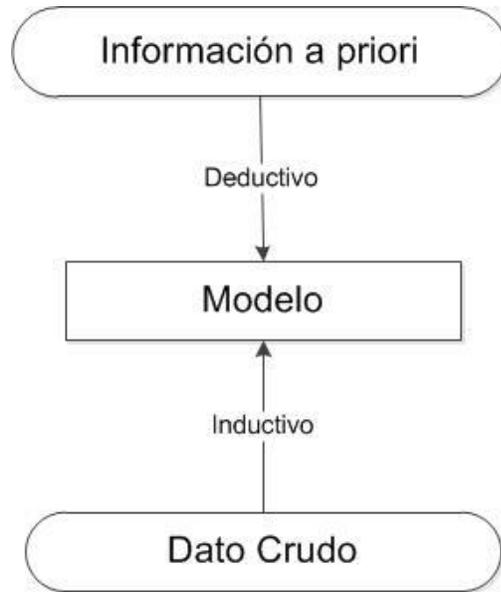


Figura 2.3 Fuentes de información para la construcción de un modelo

	Aproximación basada en conocimiento	Aproximación basada en datos
Sinónimos	Modelado	Identificación de sistemas
Diseño	Modelado de arriba hacia abajo	Aproximación de abajo hacia arriba
Razonamiento	Deductivo	Inductivo
¿Qué hace?	Codifica la estructura (interna) del sistema	Codifica la conducta del sistema (vía los datos experimentales)
Tipo de problema	Análisis	Síntesis

Tabla 2.1 Aproximaciones principales para la construcción de un modelo

En (Maldonado & Cruz Gómez, 2010), los autores definen en su glosario de términos a la simulación como: “aplicación o desarrollo de un programa con fines de investigación básica (in silico o in vitro) que, ulteriormente, puede llegar a tener implicaciones o aplicaciones prácticas”.

De manera general, antes del modelado y la simulación se necesita de una formalización matemática del problema de estudio. Pero esta no es una regla. Aunque en algunos casos, la formalización puede darse después de que se ha modelado o simulado. Cabe reconocer que la simulación y el modelamiento requieren de un análisis conceptual y/o teórico que diga cómo aproximarse, o bien, cómo resolver un problema mediante algoritmos tratables computacionalmente.

La mayoría de los autores coincide en decir que se modela o simula con base en las siguientes tres finalidades:

- Para buscar comprender y/o explicar procesos fundamentales.
- Para que un fenómeno o sistema se comporte como es deseado.
- Para ver emergencias, dinámicas, procesos, elementos y demás actores o factores que no logramos ver (= comprender) habitualmente; es decir, justamente, por fuera de la simulación y el modelamiento.

A partir de las finalidades descritas, la simulación involucra a dos facetas (Tapias, s.f.), las cuales se describen como sigue:

- Faceta 1: construir el modelo a partir de un correcto análisis del problema de estudio.
- Faceta 2: probar y evaluar alternativas para que de estas se pueda elegir y adoptar la mejor en el sistema real, procurando que aunque no sea la óptima sea lo más aproximada.

La simulación social computacional es un caso particular de simulación, un sistema informático represente al modelo, y un sistema social es el problema de estudio modelado y simulado para el entendimiento de fenómenos sociales (Maldonado & Cruz Gómez, 2010).

La simulación, la cual imita el experimento real, puede verse como una experimentación virtual, permitiendo contestar preguntas sobre el comportamiento de un sistema. Algo crucial en el esquema sistema-experimento vs modelo-experimento virtual es que hay una relación homomórfica entre el modelo y el sistema: la construcción del modelo de un sistema real y las simulación subsecuente de su comportamiento deberá producir los mismos resultados que si se realizara el experimento real, seguido por la observación y codificación de los resultados experimentales (ver Figura 2.4).

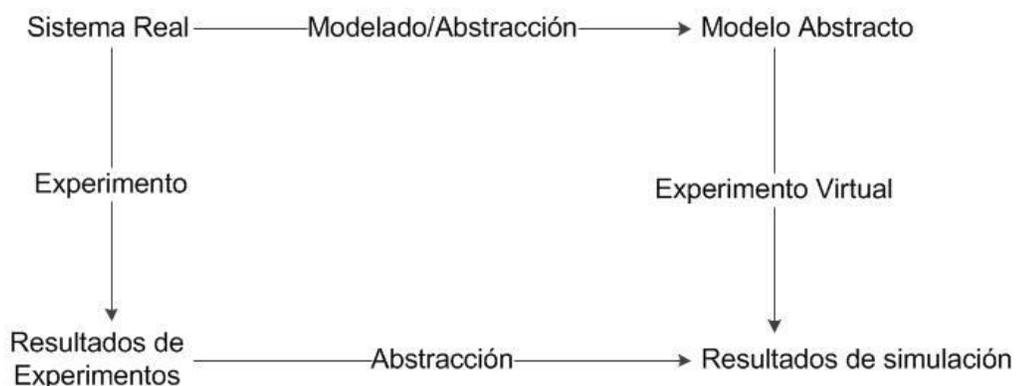


Figura 2.4 Morfismo ente modelado y simulación

Un prerequisite fundamental es, por consiguiente, cierta seguridad de que las conclusiones deducidas del modelado y la simulación (las herramientas) pueden aceptarse con confianza. El establecimiento de esta confianza está asociado con dos actividades distintas a saber: la verificación y la validación, las cuales se explican a continuación.

2.2.8 Verificación

El proceso de verificar la consistencia del programa de simulación, con respecto al modelo que da la descripción precisa de un sistema dentro del contexto de un marco experimental dado, del cual es derivado, el llamado verificación. Más explícitamente, este proceso se preocupa por la exactitud de la transformación desde una representación abstracta intermedia (el modelo conceptual) al código del programa (el modelo de simulación), asegurando que el código del programa refleje fielmente el comportamiento que está implícito en la especificación del modelo conceptual.

2.2.9 Validación

La validación consiste en el proceso de comparar las medidas del experimento con los resultados de simulación dentro del contexto de un cierto marco experimental. Cuando la comparación muestra diferencias, el modelo formal construido puede no corresponder al sistema real. Un gran número de medidas y resultados de simulación que se ajustan fielmente aunque incrementan la confianza, no prueban, sin embargo, la validez del modelo. Por esta razón, se ha introducido el concepto de falsificación, intentar falsificar o refutar el modelo. Pueden identificarse los siguientes tipos de validación (ver Figura 2.5):

- Validación conceptual: evaluación de un modelo conceptual con respecto al sistema, dónde el objetivo es, principalmente, evaluar el realismo del modelo conceptual con respecto a los objetivos del estudio.
- Validación estructural: evaluación de la estructura de un modelo de simulación con respecto a la estructura aparente del sistema.
- Validación de comportamiento: evaluación del comportamiento del modelo de simulación.

Debe notarse que la correspondencia entre el comportamiento generado por el sistema y el modelo sólo se mantendrá dentro del contexto limitado por el marco experimental. Por consiguiente, al usar modelos para intercambiar información, un modelo, antes de su uso, siempre debe emparejarse con un marco experimental. Recíprocamente, un modelo nunca debe ser desarrollado sin desarrollar simultáneamente su marco experimental.

Una apreciación global de las actividades de verificación y validación se muestra en la Figura 2.5.

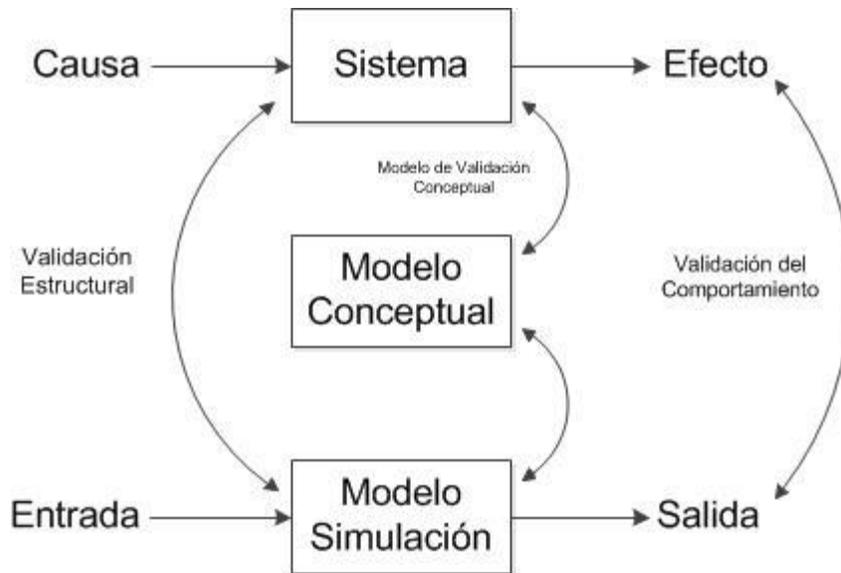


Figura 2.5 Actividades de la verificación y validación

La validez de un modelo tiene que ver sobre cuán bien representa el sistema original para el cual fue construido. En primera instancia, la validez puede ser medida por la extensión del acuerdo entre el sistema original y el modelo. Se tienen tres diferentes grados de validez, los cuales son los siguientes:

- Validez replicativa: trata de la habilidad del modelo para reproducir los datos de entrada/salida ya adquiridos del sistema real.
- Validez predictiva: trata de la habilidad para identificar el estado en el que un modelo debe ser fijado para permitir predecir la respuesta del sistema original a cualquier entrada (no solamente las usadas para identificar el modelo). Un modelo es predictivamente válido si puede ajustarse a los datos del sistema original antes de que estos sean adquiridos del sistema original. Esta es más fuerte que la validez replicativa.
- Validez estructural: trata de la relación estructural entre el sistema real y el modelo. Un modelo es estructuralmente válido si es no sólo válido predictivamente, sino también refleja las maneras en las que el sistema original funciona para producir su comportamiento.

2.3 Tipos y modos de simulación

Para que la simulación de un sistema sea coherente con el correcto análisis del problema de estudio, se debe saber modelar con apego a un sistema de simulación que represente la realidad del sistema.

2.3.1 Clasificación de sistemas

En (Tapias, s.f.), se presentan los distintos tipos de sistemas para representar la realidad, de acuerdo a su naturaleza. Estos son los siguientes:

2.3.1.1 Analíticos vs numéricos

En los casos donde se cuenta con el comportamiento numérico de las variables, conviene usar un sistema numérico. Sin embargo, si requiere de una resolución de ecuaciones matemáticas, entonces un sistema numérico es empleado.

2.3.1.2 Continuos vs discretos

Si los cambios de estado del sistema son graduales en sus variables, estos se representan en un sistema continuo, sólo cuando los mismos son en saltos de manera discontinua, un sistema discreto es empleado.

2.3.1.3 Determinísticos vs estocásticos

En los casos donde se cuenta con el comportamiento numérico de las variables, conviene usar un sistema numérico. Sin embargo, si requiere de una resolución de ecuaciones matemáticas, entonces un sistema numérico es empleado.

2.3.1.4 Dinámicos vs estáticos

En un sistema dinámico, su estado varía con el tiempo de simulación, mientras que en un estático permanece constante.

2.3.1.5 Físicos vs matemáticos

Si la realidad se representa de manera tangible, entonces se emplea un sistema físico, de lo contrario esta se representa de manera abstracta en un sistema matemático.

2.3.2 Tipos de simulación

De acuerdo a la naturaleza del modelo a utilizar, una simulación puede ser de varios tipos, tal cual lo establece (Fishman, 1978) al ser citado en (Tarifa, 2001) como sigue:

2.3.2.1 Identidad

Se da al generar un modelo que representa una réplica exacta del sistema en estudio (sistema real). Las empresas recurren a ello para mediante ensayos realizar con unidades reales choques de automóviles.

2.3.2.2 Cuasi-identidad

A diferencia de lo anterior, aquí se hace uso de una versión un poco más simplificada del sistema en estudio. Es muy útil en los entrenamientos militares debido a que a pesar de que se lleve a cabo una o más movilizaciones de equipos y tropas, una batalla real nunca es llevada a cabo.

2.3.2.3 Laboratorio

En muchas ocasiones, los modelos son contralados en un laboratorio. De entre ellos se distinguen los siguientes tipos de simulaciones:

- Juego operacional: competencia entre personas que forman una parte del modelo, el resto consiste en computadoras, maquinaria, etc. Por ejemplo: en una simulación de negocios las computadoras están encargadas de recolectar la información que es generada por cada participante y de presentarla de manera ordenada a los mismos.
- Hombre-máquina: de manera similar, las personas también forman parte del modelo, además de que toda relación entre las personas y la máquina debe ser estudiada. Como diferencia la computadora recolecta y genera información. Un simulador de vuelo es un ejemplo de este tipo de simulación.

2.3.2.4 Simulación por computadora

Se tiene un modelo simbólico que está implementado en un lenguaje computacional y se excluyen a las personas del modelo. En una simulación de un sistema de redes de comunicación, mediante modelos estadísticos se representa la conducta de los usuarios. Este tipo de simulación a su vez puede ser de alguno de los siguientes tipos:

- Digital: al emplear una computadora digital.
- Analógica: al ser utilizada una computadora analógica. Las simulaciones que utilizan modelos físicos pueden ser incluidas.

2.3.3 Clasificación de los modelos

Un modelo es un sistema similar a uno original, a veces llamado sistema real, en el sentido de que, cuando soluciona un problema que concierne al sistema original, puede solucionarlo bajo condiciones más favorables. Un modelo es por lo tanto, un sustituto factible para el sistema.

Dado el hecho de que mediante una abstracción de un sistema real se obtiene su simplificación en un modelo, no es necesario que dicha simplificación, guarde del todo una correspondencia con dicho sistema. Tarifa (2001) da una clasificación de los modelos como sigue:

2.3.3.1 Modelos teóricos vs experimentales

Cuando no se quiere modelar el comportamiento interno en el modelo construido, sino reproducir las salidas del sistema real; entonces, se tiene un modelo experimental o de caja negra. Sólo cuando se intentan reproducir las relaciones funcionales del sistema en el modelo, se habla de un modelo teórico.

Otra diferencia se da debido a que en un modelo experimental se necesita una gran cantidad de datos para su correcto ajuste o calibración, limitando su rango de validez a este conjunto de datos. Por lo contrario, la cantidad de datos requerida en un modelo teórico es mucho menor, dando como ventaja que este pueda ser utilizado fuera del rango de validez de los mismos, puesto que el rango lo estipula la teoría empleada y no los datos utilizados.

Por ejemplo: si se desea conocer el espacio que recorre un automóvil que viaja a velocidad constante en función del tiempo. Para una velocidad dada, a partir de mediciones experimentales se puede construir una gráfica de espacio vs tiempo. Teniendo en consideración que la gráfica únicamente puede generarse cuando la velocidad del automóvil es igual a la utilizada en los experimentos, para mostrar información de los intervalos de tiempo medidos.

Al describir un modelo como una caja que contiene las leyes matemáticas que vinculan las entradas o causas con las salidas o efectos, las tres aproximaciones principales del modelado pueden asociarse con el color de la caja como sigue:

2.3.3.2 Modelos de caja blanca

El modelo se deriva directamente de primeros principios teniendo en cuenta la conexión entre los componentes del sistema. Más que blanca, la caja debería llamarse transparente, en el sentido que conocemos la estructura interna del sistema.

2.3.3.3 Modelos de caja gris

A veces el modelo obtenido es incompleto debido al desconocimiento del valor de algunos parámetros. En este caso, es necesario recolectar los datos experimentales y proceder a la sintonía de los parámetros desconocidos hasta que las salidas predichas por el modelo se ajusten a los datos

observados. La estructura interna de la caja sólo se conoce parcialmente, es decir, existen zonas grises.

2.3.3.4 Modelos de caja negra

Se dice que ante la presencia de limitaciones del conocimiento actual del sistema real a modelar o por la complejidad involucrada en el modelo a generar, si dicho modelo cuenta con una base teórica, entonces tiene además una parte con base empírica. Lo anterior quiere decir que dado que no se cuenta con una teoría apropiada, o bien, la implementación de la más conveniente es demasiado compleja, se deben llevar a cabo experimentos para determinar los valores de los parámetros, o en su defecto definir las relaciones entre las variables involucradas.

Un ejemplo claro se da cuando se desean saber los tiempos óptimos de semáforos en un cruce, o bien, analizar aquellos que mejor agilicen el flujo de vehículos y además eviten en la medida de lo posible las saturaciones en las calles que son unidas por el cruce. Esto no es sencillo y se deben llevar a cabo mediciones del flujo vehicular en intervalos de tiempo a lo largo de mediciones diarias, semanales o por qué no mensuales o incluso anuales.

Al desarrollar un modelo estadístico, se pueden emplear funciones teóricas de distribución; pero seguirá siendo necesario recurrir a la experimentación para determinar parámetros, ejemplos de parámetros lo son el promedio (valor medio) y la varianza de la muestra recabada en los experimentos.

Un polinomio es el modelo de caja negra más simple que existe. Cuando el orden del mismo es fijado, se puede reducir el problema con sólo determinar los valores de los coeficientes que minimicen la sumatoria de los cuadrados de los errores reportados. Sólo si el orden óptimo del polinomio debe ser encontrado, es cuando los coeficientes serán dados al minimizar la varianza de los errores de la muestra empleada. Si se tiene a más de una variable independiente involucrada en el problema, se prefiere encontrar una función distinta de un polinomio que tenga alguna base teórica o empírica en vez de un polinomio. Es en los modelos estadísticos donde se emplean funciones de este tipo.

Cuando los errores de los datos experimentales, junto con los de la interpolación lineal o cuadrática dentro de los intervalos de la muestra, son mínimos o insignificantes, es posible el empleo de una tabla de datos experimentales como modelo.

Únicamente cuando no puedan ser ajustados los datos experimentales mediante un polinomio, una función o una tabla; será conveniente optar por un modelo más complejo. Ejemplo de estos modelos

lo dan las redes neuronales artificiales, puesto que son utilizadas para modelar sistemas con múltiples variables no lineales.

Cuando la estructura interna del sistema es desconocida, la única posibilidad es recolectar datos y usarlos para presumir los vínculos entre las entradas y las salidas. Sin embargo, el modelado de caja negra es también útil para tratar sistemas muy complejos donde la aproximación de caja blanca fuera muy costosa y consumiría mucho tiempo.

Si la ruta del modelado (deductivo) es imposible, se tiene que tratar el sistema como una caja negra (o gris) y tratar de deducir un modelo vía el análisis de los datos de los registros de las señales de entrada-salida. Ésta es la ruta de la identificación, la cual está basada en la experimentación.

Alonso Sarría & Palazón Ferrando (2008) dan por su parte la siguiente clasificación:

2.3.3.5 Verbal vs icónico

Un modelo es verbal cuando responde a una descripción del sistema y su funcionamiento utilizando el lenguaje humano para ello. Se dice que es la fase previa al desarrollo de cualquier modelo. Salvo que se base en la representación de los componentes del sistema mediante símbolos, es de tipo icónico.

2.3.3.6 Físico vs matemático

Si se emplean prototipos para crear el modelo se dice que este es de tipo físico. Los prototipos pueden ser analógicos (analogía existente entre dos sistemas físicos diferentes uno, el que interesa estudiar, y otro mucho más sencillo de estudiar que actúa como modelo) y a escala (modelos reducidos del sistema que se estudia).

Actualmente, los modelos matemáticos son los más utilizados, puesto que mediante un conjunto de ecuaciones matemáticas se da una representación del estado de los componentes de un sistema y los flujos entre ellos. Pueden ser simples o complejos cuando incluyen una gran cantidad de ecuaciones y reglas, estos últimos suelen ser simulados en computadora.

Cabe hacer notar que en los modelos matemáticos su descripción está limitada a los enlaces cuantitativos dados entre los atributos medibles de los sistemas reales, con lo cual están delimitados a ser solamente descripciones parciales. Acorde a (Guidorzi, 2003), la evolución asintótica de la ciencia virtualmente ha cancelado la posibilidad de lograr descripciones exactas de la realidad. Por lo tanto, la construcción de modelos matemáticos debe estar gobernada más por criterios de utilidad que por los (siempre relativos) criterios de verdad. Los modelos matemáticos han sido definidos

como conjuntos de relaciones entre los atributos medibles de un sistema, que describen las relaciones establecidas por el sistema entre estas cantidades. Esto limita la capacidad descriptiva de los modelos matemáticos a los atributos que pueden ser expresados por medio de números y muestra además que estos modelos constituyen, en todo caso, solamente una descripción aproximada de la realidad.

El modelado físico se basa en la partición del sistema en subsistemas y en su descripción por medio de leyes conocidas. Entonces el modelo se obtiene uniendo tales relaciones en un todo. Esta aproximación requiere un conocimiento general de la estructura o el diseño del sistema considerado y de las leyes que describen su comportamiento. Ya que las leyes físicas son, a su vez, modelos obtenidos de observaciones o de especulaciones no falsificadas, el modelado físico consiste en construir el modelo completo de la unión de modelos simples ya establecidos.

Las ventajas del modelado físico consisten en la posibilidad de usar, en el procedimiento de construcción del modelo, la información a priori sobre el sistema y del significado físico de las variables del modelo. Este procedimiento no puede aplicarse, sin embargo, a sistemas cuya estructura interna no es conocida y cuyo comportamiento no es descrito por relaciones establecidas o cuya complejidad conduciría a modelos inmanejables dónde la mayoría de los parámetros sólo influiría marginalmente sobre los aspectos a ser reproducidos del comportamiento del sistema.

Moore et al. (1993), citado en (Alonso Sarría & Palazón Ferrando, 2008), establece que las características deseables de los modelos matemáticos son las siguientes:

- Parsimonia: un modelo no es necesariamente mejor por tener muchos parámetros. La simplicidad es siempre deseable.
- Modestia: deben tratar de alcanzarse sólo objetivos asequibles. Un modelo, al igual que un mapa, no debe aspirar a imitar la realidad sino sólo a resaltar aquellos aspectos de interés para su aplicación.
- Exactitud: el modelo debe reproducir en la medida de lo posible el funcionamiento del sistema y generar valores para las variables de salida y estado similares a los observados en la realidad.
- Verificabilidad: los resultados del modelo deben poder compararse con datos reales y determinar de este modo el grado de exactitud del modelo.
- Por otro lado, no basta con que funcionen bien, deben funcionar bien por las razones correctas.

La aproximación intrínseca realizada por la introducción de los modelos puede ser mejor evaluada en el contexto de una clasificación basada en los propósitos del modelado, los cuales son la interpretación, la predicción, el filtraje, el diagnóstico y la simulación.

La aproximación inherente asociada a los modelos da la idea general de que puedan ser usados diferentes modelos del mismo sistema para los diferentes propósitos del modelado, optimizando su rendimiento para estos. Debe preferirse el modelo más simple entre los modelos disponibles.

2.4 Fases y etapas de la simulación

Para crear un modelo se requieren seguir los siguientes pasos:

1. Identificación: determinar los componentes y relaciones, así como la formalización matemática de estos en el modelo.
2. Calibración: establecer los valores de los parámetros; ya sea mediante mediciones de campo, o bien, empleando algún modelo empírico para su estimación.
3. Validación: obtener las variables de estado y salida en el pasado para su comparación con valores reales de las mismas. La idea es evaluar el error cometido por el modelo y determinar si es aceptable o no.
4. Simulación: obtener las variables de estado y de salida en un tiempo futuro mediante las variables de entrada.
5. Análisis de sensibilidad: alterar los valores de los parámetros para determinar el grado de incidencia o afectación de ellos en los resultados obtenidos en la simulación por el modelo.

Cabe mencionar que la identificación del modelo es de lo más esencial e importante, dado que se debe tener claro que problema se va a modelizar y con qué propósito se va a simular. Cuando el problema no sea claramente identificado el modelo será muy difícil que sirva para algo. Es este paso en donde se establecen los límites espaciales y temporales, así como las escalas del modelo, los cuales facilitarán su modularidad, programación, prueba y verificación (validación).

El enfoque abajo-arriba trata de inferir la información estructural a partir de los datos experimentales y de llegar a un modelo utilizable bajo un marco experimental dado. Este enfoque puede generar un número infinito de modelos que satisfacen las relaciones de entrada-salida observadas. Así que, no existe ningún procedimiento directo para determinar la estructura de un modelo. Son necesarios un conjunto de principios guía y procedimientos cuantitativos para inferir la estructura a partir de los datos. Más específicamente, es deseable tener restricciones o suposiciones adicionales que ayuden a seleccionar un modelo "óptimo".

Las observaciones de un sistema pueden obtenerse activa o pasivamente. En el primer caso, quien hace el modelado define unas entradas de interés, aplica éstas al sistema bajo estudio, y observa los resultados. En el segundo caso, quien hace el modelado no puede especificar las entradas y tiene que aceptar cualquier juego de datos de entrada-salida disponible.

La identificación consiste en la selección de un modelo específico en una clase específica sobre la única base de las observaciones llevadas a cabo sobre el sistema y de un criterio de selección. El procedimiento completo no hace referencia alguna ni a la naturaleza física del sistema, ni a los conocimientos a priori de quien lo realiza; solamente los datos hablan.

Las variables internas de los modelos identificados podrían carecer de cualquier significado físico y lo mismo puede afirmarse respecto a los parámetros del modelo. Tales modelos son, de otro lado, simples, exactos y pueden extraer de situaciones complicadas solamente algunos aspectos relevantes.

Banks et al. (1996) citado en (Tarifa, 2001) establece que en el desarrollo de una simulación se pueden distinguir las siguientes etapas:

2.4.1 Formulación del problema

Se debe establecer perfectamente cuál es el objeto de la simulación y detallar los siguientes factores: los resultados que se esperan de la simulación, dar un plan detallado de experimentación, delimitar según el tiempo disponible, identificar las variables de interés, qué tipo de perturbaciones serán estudiadas, decidir si habrá o no algún tratamiento estadístico de los resultados, entre más como considerar la complejidad de la interfaz del simulador. En los casos donde haya interacción con el sistema, este será operado por un usuario, de lo contrario, este sólo recibirá los resultados arrojados. Algo muy importante es conocer de parte del usuario qué tipo de trabajo solicita, uno de simulación, o bien, uno de optimización.

2.4.2 Definición del sistema

Aquí, se define con lujo de detalle y claridad el sistema a simular. Además, se debe delimitar el sistema a estudiar, así como el tipo de interacciones que pueda tener con el entorno o medioambiente.

2.4.3 Formulación del modelo

Esta fase comienza al desarrollar un modelo simple inicial, pero que capture todo aspecto relevante del sistema real. De la formulación o planteamiento del problema, dependerán los aspectos

relevantes del sistema real. El modelo inicial será enriquecido luego de varias iteraciones de refinamiento posterior.

2.4.4 Colección de datos

A partir del planteamiento del problema y de la formulación del modelo, el origen y cantidad de datos necesarios pueden ser conocidos o estimados preliminarmente. Por medio de registros históricos, experimentos de laboratorios o mediciones realizadas en el sistema real, los datos pueden ser recabados o recopilados. Luego de su recopilación, se deben procesar de la manera más adecuada, con el objeto de que cumplan con el formato requerido por el modelo.

2.4.5 Implementación del modelo

Por general, un modelo es implementado mediante la generación de un sistema computacional empleando un lenguaje de programación, un entorno de desarrollo y posiblemente una plataforma de modelado y simulación virtual 2D/3D.

2.4.6 Verificación

Es muy importante evitar, identificar y corregir todo posible error que pueda ser generado tanto en las fases iniciales como en las fase de prueba o experimentación. Los más importantes a ser detectados son los que posiblemente fueron cometidos durante la implementación del modelo. Una herramienta de depuración es muy útil en todo caso, y está por lo general ya viene incluida en el entorno de desarrollo y en la plataforma de modelado y simulación.

2.4.7 Validación

Se debe comprobar que en efecto el modelo refleje al sistema real, o bien, a la delimitación de este último. Una estrategia que ha dado buenos resultados, pero que en ocasiones es costosa en tiempo y recursos es el llevar a cabo una comparación de las predicciones dadas por el modelo con mediciones realizadas en el sistema real, datos históricos o datos de sistemas similares. Un inconveniente o situación demasiado común es la necesidad de modificar el modelo junto con la recolección de nuevos datos.

2.4.8 Diseño de experimentos

Los casos de estudio o experimentos son decididos en esta etapa, al dar las características de estos como lo son: los tiempos de inicio y de simulación, datos requeridos, así como el número de simulaciones que deben ser llevadas a cabo.

2.4.9 Experimentación

Con base en un diseño previo, las simulaciones deben ser realizadas. De los resultados obtenidos, se debe cuidar que los mismos sean recolectados y procesados de manera adecuada para que sean útiles y en la medida de lo posible facilitar su análisis e interpretación.

2.4.10 Interpretación

Desafortunadamente, la incertidumbre puede estar presente como una debilidad a ser atacada en el modelo con respecto a los parámetros de entrada y resultados que carezcan de precisión. En ocasiones así, será necesario recolectar datos adicionales para que la estimación de los parámetros sea refinada y los resultados más precisos.

2.4.11 Implementación

Muchos de los usuarios pueden no estar familiarizados, o bien, carecen de conocimientos previos para usar el sistema. Es por ello, que al implementarlo se debe procurar que resulte amigable y de fácil uso, así como que permita una correcta interpretación de los resultados arrojados por el mismo.

Existen en la literatura distintas enumeraciones y definiciones de las etapas de la simulación, tal es el caso de lo que se dice en (Tapias, s.f.), al dar las siguientes nueve: definición del sistema con el máximo de detalle, elección del método para realizar el estudio, variables a incluir en el modelo, recolección y análisis de los datos del sistema, definición de la estructura del modelo, programación del modelo, validación del modelo, y finalmente, análisis y crítica de los resultados. Se puede que observar que hay mucho parecido en ambas enumeraciones y es más un libre criterio de decisión el que deba ser aplicado a la hora de optar por una de ellas, inclusive una distinta, según sean las necesidades que se tengan.

2.5 Incertidumbre en el modelado

Zimmermann (2000), citado en (Alonso Sarría & Palazón Ferrando, 2008), define cinco causas de incertidumbre en la modelización:

1. Falta de información: requiere la recolección de información adicional aunque hay que tener en cuenta que la información debe ser adecuada tanto en calidad como en cantidad. En todo caso la complejidad de los sistemas ambientales obliga a una simplificación de la información disponible. El objetivo estaría en buscar un adecuado punto intermedio entre simplicidad y completitud.
2. Evidencias contradictorias: en ocasiones los resultados de un modelo pueden aparecer en contradicción con otros resultados previos o con la evidencia de campo, es necesario evaluar si estas contradicciones se deben a errores o están realmente presentes.

3. Ambigüedad: cuando la información se suministra en un formato que puede dar lugar a confusiones.
4. Incertidumbre de las medidas por falta de precisión, puede solventarse utilizando técnicas de medición más precisas. Sin embargo, la inversión en instrumental caro no garantiza la falta de errores.
5. Los juicios a priori del investigador a la hora de evaluar los resultados de un modelo pueden ser diferentes a los de otro investigador.

2.6 Ventajas y desventajas de la simulación

Con la ayuda de la simulación se obtiene y gana lo siguiente:

- Reducir costos y evitar riesgos puesto que no se compromete la confiabilidad del sistema en las pruebas, todo es simulado y no real.
- Modelar los problemas del mundo real en sistemas simples o complejos.
- Evaluar alternativas virtuales con las pruebas y ensayos, que por costo y tiempo pueden ser imposibles de lograr en un sistema real.
- Utilizarse para entrenamiento y capacitación.
- Tener un mejor entendimiento del mundo real.

Desafortunadamente, existen algunas desventajas notables de la simulación, tal como se dice a continuación:

- Debe evitarse en situaciones donde hayan técnicas analíticas. Una técnica de este tipo permite plantear, resolver y optimizar todo el sistema, o en su defecto, alguna parte del mismo.
- No debe saturarse a la simulación, los resultados deben ser analizados y comprendidos por especialistas y no por toda persona.
- No por el hecho de simular, se puede afirmar que el modelo sea correcto.
- Existe el riesgo de inferir conclusiones falsas cuando el modelo no represente a la realidad.
- No siempre las alternativas a simular son representativas de la realidad y con ello las estrategias fallan.

2.7 ¿Cuándo emplear la simulación por computadora?

La simulación es conveniente cuando:

- No se puede tener una formulación matemática que sea resoluble analíticamente. Actualmente, no es posible tener modelos matemáticos de muchos sistemas reales, por ejemplo, la conducta de un conductor en la red vial urbana.
- Cuando sea difícil obtener una solución analítica, aunque exista una formulación matemática. Los modelos matemáticos utilizados para modelar tráfico vehicular y comportamiento de conductores son imposibles de resolver en forma analítica sin realizar serias simplificaciones, o bien, delimitaciones.
- El sistema real no existe y se tiene que diseñar un sistema nuevo. Al contar con un modelo adecuado para realizar experimentos, el diseño del sistema mejorará notablemente.
- Se tienen impedimentos económicos, de seguridad, de calidad o éticos para llevar a cabo experimentos sobre el sistema real, los mismos hacen que se descarte esta opción. Un ejemplo de esto es la imposibilidad de provocar fallas mortales en un automóvil real en movimiento sobre una avenida para evaluar la conducta del conductor.
- La evolución del sistema es lenta o muy rápida. Un ejemplo de dinámica lenta es la evolución del clima. Dadas las condiciones climáticas actuales, no se debe esperar a que una tormenta inunde parcial o totalmente una ciudad para luego dar el mensaje de alerta y que se evite a daño a vehículos y conductores, además de peatones. Por otra parte, se sabe de fenómenos o incidentes que ocurren con rapidez y que deben ser simulados para poder observarlos en detalle, por ejemplo, un choque entre dos automóviles provocado por el descuido de uno o ambos conductores.

2.7.1 Resolución analítica vs simulación

De manera analítica, algunos modelos simbólicos pueden ser resueltos. La simulación analítica como ventaja da una visión integral sobre la conducta y funcionamiento del sistema. Mediante variaciones o cambios de valor en sus parámetros se pueden fácilmente identificar cambios importantes en el comportamiento, detectar puntos críticos y sacar conclusiones generales para el tipo de sistema analizado.

2.7.2 Simulación de Montecarlo

Cuando se emplean números aleatorios uniformemente distribuidos en el intervalo $[0,1]$, se dice que se tiene una simulación de Montecarlo, esta es un método que es utilizado para resolver problemas donde la evolución con el tiempo no es de relevancia o importancia.

Capítulo 3 Tráfico y congestión vehicular

Hoy en día, la congestión y el mal flujo de tráfico vehicular son de los principales problemas urbanos alrededor del mundo, principalmente en las grandes ciudades. Al respecto, el manejo adecuado del tráfico en redes viales congestionadas, requiere una clara comprensión y entendimiento, de cómo el flujo vehicular debe ser mejorado. Esto es, adentrarse a las causas y efectos de la congestión vehicular, que determinan las horas y lugares donde puede presentarse, o bien, ya se manifiesta, así como la manera en la que el flujo se distribuye a través de la red vial.

La gestión de las redes viales para mejorar la disminución del tráfico y congestión vehiculares siempre ha sido uno de los problemas más interesantes y desafiantes en el diseño y mejora de estrategias de mejoramiento urbano. A medida que el número de vehículos se acerca o supera la capacidad existente de una red vial, el flujo de vehículos se deteriora y, desafortunadamente, esto resulta en vialidades saturadas que no son capaces de soportar adecuadamente las demandas de tráfico vehicular.

3.1 ¿Qué es el tráfico vehicular?

Recurriendo al sentido común, se puede decir que a la agregación de vehículos o circulación de los mismos cuando van y vienen en una vialidad durante un período de tiempo especificado, es denominada flujo vehicular.

En una red vial como lo es una red de carreteras, al producirse un aumento de vehículos, caracterizado por velocidades más lentas, tiempos de viaje más largos, y el aumento de colas de vehículos, se origina el efecto producido por el fenómeno urbano del tráfico vehicular, algunas veces llamado tránsito vehicular.

En el prefacio de su libro intitulado “Elementos de la teoría del tráfico vehicular”, Fernández (2008), define al mencionado fenómeno como: “la circulación de personas, algunas de ellas en vehículos, por el espacio público”. Argumentando además que es un fenómeno físico y a la vez social.

Estando de acuerdo con el previamente citado autor, cualquier análisis de los problemas del tráfico urbano como fenómeno, debe partir primeramente, por entender las bases conceptuales del mismo. A estas bases se les denomina o conoce como la teoría del tráfico vehicular. Una vez entendidos los elementos de esta teoría, pueden ser aplicados a la ingeniería de tránsito, la cual el mismo autor define como: “la aplicación de técnicas de la ingeniería para aminorar los impactos sociales, urbanos y ambientales derivados del tráfico”.

Mediante la correcta aplicación de la mencionada ingeniería de tránsito, los encargados de una mejora o nueva creación vial deben crear diseños conceptuales que deben ser traducidos a planos de ingeniería. Así, estos planos son materializados en calles. Con la consecuencia de que ningún dispositivo vial o medida de gestión de tráfico sea acabado sin antes conocer y aplicar los principios aportados por la descrita teoría.

3.2 Análisis de un sistema de control y reducción de tráfico vehicular

La causa principal de la congestión del tráfico vehicular es que el volumen de tráfico está demasiado cerca de la capacidad máxima de una vialidad. La congestión en las ciudades mexicanas es peor que muchas, quizás la mayoría, de otras ciudades latinoamericanas. Y lo que es más importante, es cada vez peor, año tras año.

La congestión vehicular se produce principalmente como resultado del aumento del número de vehículos que compiten por un limitado espacio disponible en vialidades. Los conductores al desplazarse desde cualquier punto de origen a cualquier destino tienden a elegir las vialidades que se encuentran en la ruta con el tiempo de viaje más corto. Este comportamiento resulta en una subutilización de algunas, mientras que otras se someten a más tráfico vehicular de lo que están diseñadas, lo que resulta en su inminente congestión vehicular.

Esto se debe a que el tráfico vehicular está creciendo más rápido que la capacidad vial. Este no es un problema temporal, seguirá siendo el caso, en ausencia de medidas para reducir el tráfico vehicular, ya que es imposible igualar un programa de vialidades a tendencias sin restricciones en el crecimiento del tráfico vehicular. Bajo los actuales marcos sociales y económicos, no hay políticas factibles que puedan reducir la congestión a cero en la práctica, o que sería útil hacer en teoría.

En esencia, es necesario desarrollar un modelo de un sistema apropiado de control de tráfico vehicular, a fin de estudiar las causas y efectos de la congestión vehicular para su control y reducción.

3.2.1 Estrategias y metodología

Actualmente y desde hace décadas, en las grandes áreas urbanas durante los períodos de mayor demanda, conocidos como horas pico, la congestión vehicular es inevitable. Aunque se hayan llevado a la práctica distintas estrategias para su control y reducción, los costos que estas imponen suelen ser elevados. Muchas estrategias han fallado debido a la metodología empleada, puesto que los programas llevados a cabo carecen de un análisis previo que brinde una correcta orientación para un éxito aceptable en la práctica.

Thomson (2000), dentro del proyecto “Charging for use of road space in Latin America cities”, expuso algunas de las causas más relevantes de la congestión vehicular, diciendo lo siguiente:

- Son los automóviles los que han creado en mayor medida el problema: un auto tiene menor capacidad de transportar a pasajeros y la mayor parte de las veces sólo llevan a uno, el conductor. Lo cual es contrario al transporte público, que puede transportar a una cantidad mayor de personas y se ve obligado a demorarse más en sus desplazamientos.
- Algunas costumbres de los conductores causan mayor tráfico vehicular: en las ciudades latinoamericanas se aprecian comportamientos en los conductores se estacionan en las avenidas y en puntos antes de los cruceros, causando bloqueos de libre tránsito para otros.

Además, dentro del mencionado proyecto, se habló de las distintas estrategias que han sido aplicadas para contrarrestar al tráfico vehicular, las cuales también son abordadas en (Bull, 2003), destacando las siguientes:

- Crecer y proporcionar más infraestructura vial: esto pocas veces ha servido, ya que se sigue presentando el problema de la congestión vehicular en las horas pico.
- Expansión de la red de transporte público: en las ciudades que cuentan con líneas del metro, al querer transportar a una mayor cantidad de pasajeros de manera colectiva y en masa, no ha reducido de manera significativa la congestión vehicular, puesto que afuera de las estaciones se congrega esta, debido a que forzosamente los usuarios deben recurrir al uso de un medio adicional que los lleve de otros lugares a dichas estaciones, o bien, de dichas estaciones a otros lugares, generando un mayor tráfico vehicular en el entorno colindante.
- Mejorar el transporte público y fomentar un menor uso del automóvil: ha habido dudas de si esta estrategia realmente es atractiva para los automovilistas, ya que es más cómodo viajar en auto propio que hacerlo de manera incomoda en el transporte público.
- Tener medidas de tarificación vial: esta implica tener vías de cuota que en un principio buscaban que quienes quisieran reducir sus tiempos de traslado pagaran por el uso de vías privadas de mayor flujo vehicular, sin embargo, estas no son suficientes y han presentado el mismo problema de sobresaturación en horas pico.
- Escalonamiento de horarios: esta es muy difícil de evaluar y de llevar a la práctica, ya que supone que se les reste o quite el derecho de libre tránsito a los automovilistas en ciertas horas del día en zonas de gran congestión vehicular.
- Acciones sobre los cruceros: mejor diseño de las intersecciones con adecuados sistemas de control, para contar con adecuados retornos y gloriets para una mejor distribución del flujo vehicular, pero esto suele ocasionar congestión sobre los cruceros, tanto para quienes entran como para los que salen de los mismos.

- Carriles dedicados al transporte público: esto ofrece una reducción de los tiempos de traslado para el transporte público pero acarrea una reducción de carriles y disminuye la capacidad de traslado para los automovilistas, en horas pico el tráfico vehicular ha empeorado en vez de ser mejorado.

En países como México, existen programas del “Hoy no circula”, los cuales tampoco han funcionado de manera adecuada, puesto que muchos automovilistas prefieren comprar un auto adicional para poder circular toda la semana. Además se han fomentado desde la última década, programas de uso de medios alternativos de transporte, como lo es la bicicleta, pero estos programas demandan de inversión en obras de infraestructura nueva para la habilitación de ciclistas en las vialidades, causando problemas fuertes de tráfico vehicular durante las obras y además al reducir la capacidad de las vialidades, se tiene un mayor tráfico vehicular al previo.

Lo que aparenta ofrecer un mejor camino para resultados más promisorios es crear programas de estrategias bajo un enfoque metodológico de paquete de medidas que busquen lo que sigue:

- Bien aprovechar la infraestructura existente y antes de crecerla, ver si son necesarios nuevos costos de inversión.
- Eficientar los tiempos y dar una mejor sincronización de los semáforos para buscar reducir las tasas de congestión vehicular en los cruces. Esto demanda tener una semaforización inteligente y autoadaptable a las necesidades de control y reducción del tráfico vehicular las 24 horas del día y los 7 días de la semana de manera ininterrumpida.

Bajo lo anteriormente descrito, la simulación ofrece una herramienta poderosa que manejada de manera adecuada daría las respuestas deseadas a grandes premisas, tales como saber si una estrategia funcionaría o no. Es aquí en donde se puede sacar ventaja para un mejor análisis y diseño de un sistema adecuado de control y reducción de tráfico vehicular, el cual puede ser pulido y mejorado bajo las ventajas del modelado y simulación.

3.2.2 Especificaciones de módulos

Para que un sistema de mejora del congestionamiento vehicular tenga éxito en la práctica, la simulación demanda previamente una correcta división de módulos en la fase de análisis para una buena definición en el proceso de modelado.

Existen tres variables que siempre definen las características del flujo vehicular, el flujo, la velocidad y la densidad; las cuales son empleadas para la operación de los sistemas de tránsito existentes. Sin embargo, para una optimización de los sistemas de control y reducción de tráfico de vehicular

conviene tener al menos la siguiente especificación de módulos a partir de un correcto modelado y buena simulación (Fernández, 2008):

- Manejo de vialidades: controlando su capacidad y grado de saturación.
- Optimización de cruces: sincronización de semáforos, uso señales de prioridad y distribución del flujo vehicular mediante glorietas.
- Transferencia de pasajeros: estaciones y paradas de transporte público y del metro.
- Habilitación peatonal: cruces de peatones en semáforos o pasos establecidos como los de cebra.
- Apoyo a automovilistas: uso de monitores de información para informar sobre el estado actual del tráfico en zonas de mayor congestionamiento para que se anticipe el uso de vías alternas.

3.3 Simulación de tráfico vehicular

En (Delgado, Saavedra, & Velasco, 2011) se establece que el flujo vehicular en las vialidades, puede ser estudiado a mediante distintas escalas, es decir, para que se aprecien aspectos y descripciones distintos desde lo global a lo particular. Con ello, al apreciar el flujo de los vehículos a gran escala se observa el movimiento global, contrario a lo que ocurre cuando se quiere distinguir cada vehículo individual a una escala particular sin importar perder una visión global de los fenómenos que están ocurriendo.

Para que el diseño de un entorno de tráfico real sea llevado con éxito a términos computacionales mediante la simulación, se deben comprender el comportamiento y causas que lo provocan, esto es para que se puedan evaluar nuevas estrategias que permitan obtener posibles soluciones. La simulación del tráfico vehicular se puede llevar a cabo mediante las siguientes tres perspectivas de enfoque para su mejor apreciación y estudio:

3.3.1 Simulación microscópica

Tomando como componentes individuales al automóvil (o automovilista) y al peatón, en un sistema de simulación de esta naturaleza se considera el comportamiento aislado de ellos. Con los resultados del análisis obtenido se pueden plantear estrategias de solución aplicables a todos los componentes.

Si se emplea una herramienta o plataforma de modelado, es deseable que para cada automóvil se permita modificar algunas de sus características como son la aceleración, desaceleración, intervalo entre vehículos, cambios de carril, incorporaciones. Así se puede dar una mejor calibración para casos específicos ante escenarios muy particulares. Con herramientas como AnyLogic (Merkuryeva

& Bolshakovs, 2010) es posible realizar esto para tener una especificación particular de excenarios ante situaciones muy particulares.

Este enfoque de simulación es muy costoso, debido a que demande un nivel de detalle muy fino provocando que constantemente se tenga que actualizar el estado de vehículos y peatones debido a su dinamismo y continuo cambio de estado (Villà & Robusté, 2000). De esta forma y bajo eficiencia computacional, la complejidad algorítmica del sistema de simulación puede llegar a ser elevada al simular redes viales de gran tamaño. Sin embargo, para redes pequeñas es una buena alternativa, ya que ofrece todos los detalles que en ella ocurren.

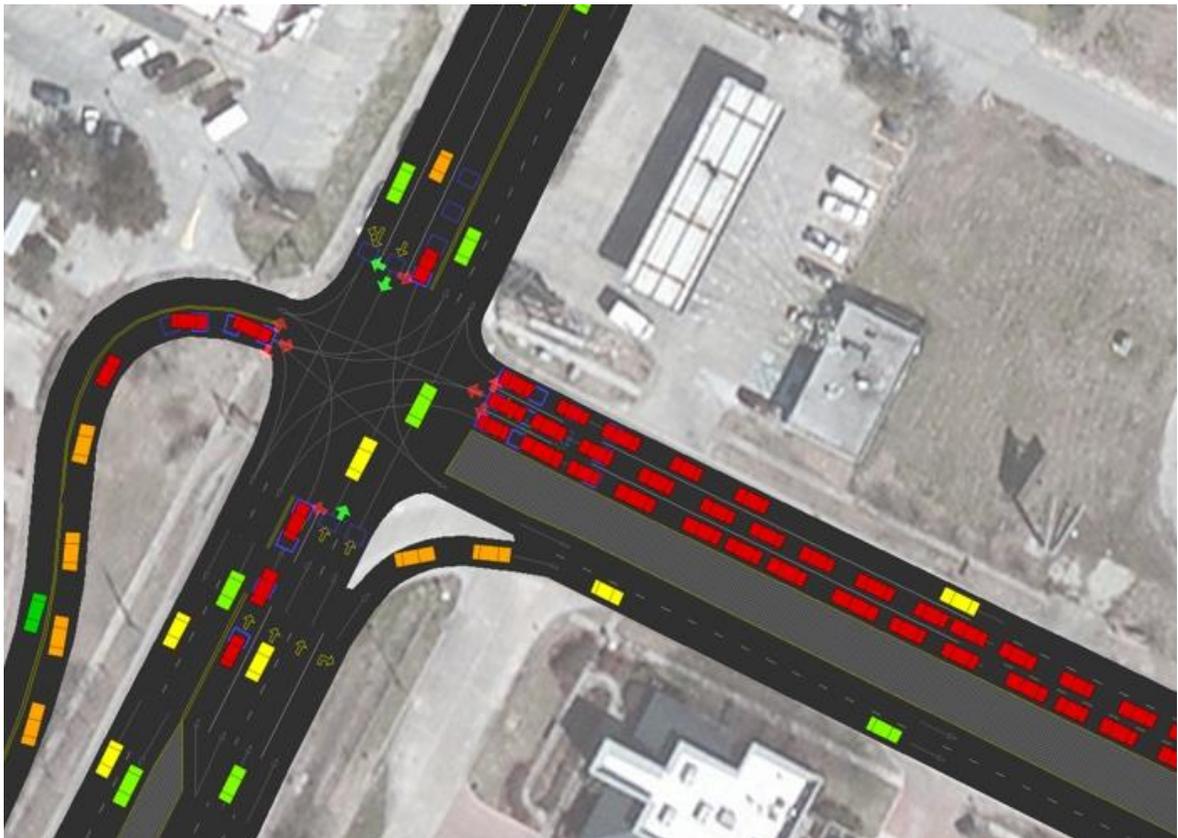


Figura 3.1 Simulación microscópica del tráfico vial

3.3.2 Simulación mesoscópica

Bajo este enfoque de simulación, la apreciación del fenómeno de tráfico vehicular se aprecia mediante la clasificación en conjuntos de los vehículos por bloques de tráfico y de los peatones por bloques de desplazamiento, para que el flujo vehicular se predefina con base en capacidades y funciones de velocidad-densidad.

Una de las ventajas que ofrece la simulación mesoscópica es la libertad y facilidad de poder simular redes viales de tamaño mediano, para las cuales es más fácil dar una calibración debido a que se contemplan un menor número de parámetros, con la ganancia de una mejor estabilidad al momento de realizar ajustes o modificaciones, lo cual es complicado y costoso en una red vial simulada bajo el enfoque de la simulación microscópica, puesto que esta última busca ofrecer un nivel de detalle muy alto.

Se puede decir que bajo un modelado y simulación mesoscópicos, se logra reducir y simplificar el seguimiento de vehículos y peatones, ya que lo que se sigue y analiza es a los conjuntos de estos. Sólo se trabaja a nivel individual cuando un elemento entra o sale de tales conjuntos, logrando reducir considerablemente las actualizaciones de los cambios de comportamiento.

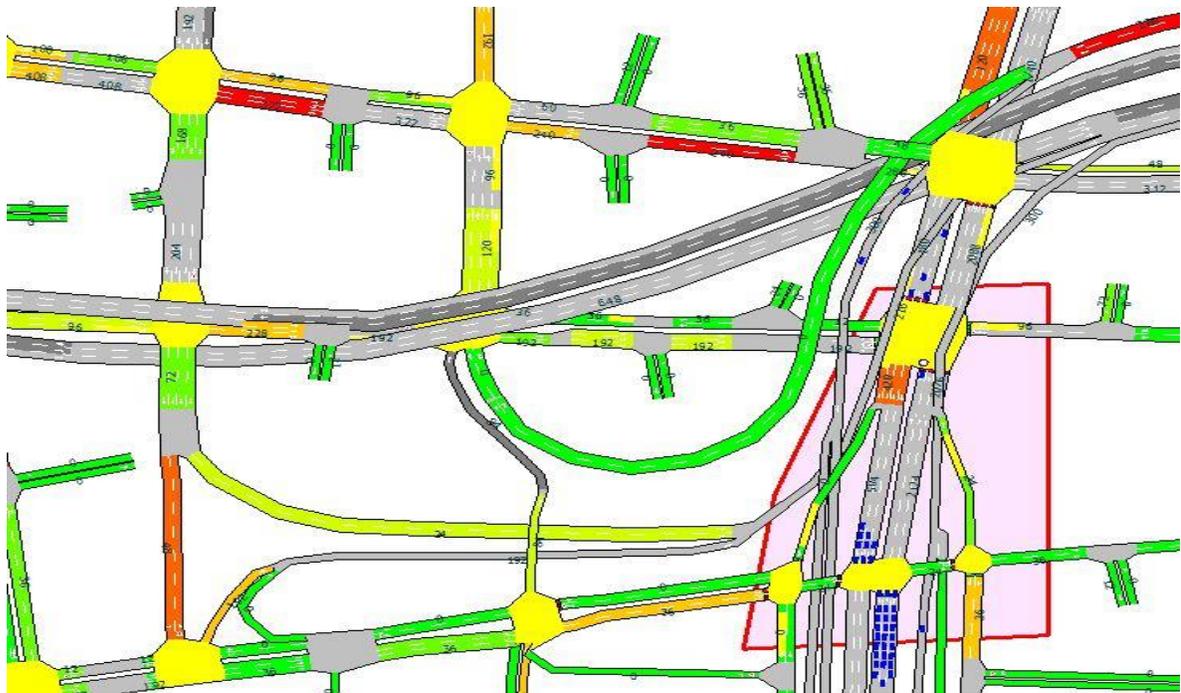


Figura 3.2 Simulación mesoscópica del tráfico vial

3.3.3 Simulación macroscópica

Cuando se emplean a los modelos macroscópicos como alternativa para simular el tráfico vehicular, se guarda siempre una relación con base en la velocidad de los vehículos, la densidad del congestionamiento vehicular y el flujo de los vehículos a manera de seguimiento de volúmenes, análisis de concentraciones y velocidades de congestionamiento y descongestionamiento, permitiendo un fluido continuo, esto se puede verificar en lo que sostienen Pérez et al. (2014).

Algo destacable de este enfoque, es la bondad del modelado de los semáforos de manera explícita, lo cual no se logra bajo los modelos mesoscópico y macroscópico. Sin embargo, una desventaja es que situaciones de cambio de carril no pueden ser representadas, lo cual si es posible de manera microscópica o mesoscópica.

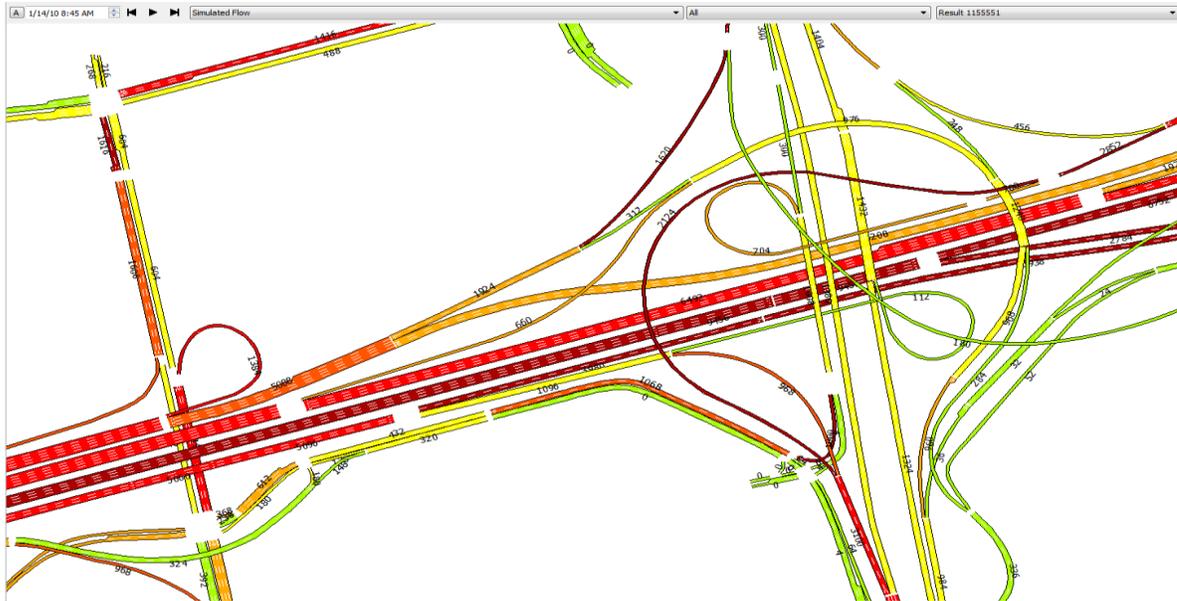


Figura 3.3 Simulación macroscópica del tráfico vial

3.3.4 Simulación microscópica vs mesoscópica vs macroscópica

Los simuladores de tráfico van de lo microscópico a lo macroscópico, dependiendo del nivel de detalle requerido. Simulaciones macroscópicas modelan el flujo de tráfico utilizando modelos matemáticos de alto nivel a menudo derivados de la dinámica de fluidos, por lo tanto, son simulaciones continuas. Este tipo de simulaciones tratan a cada vehículo como un agente individual, así como a las variables de entrada y de salida, tales como la velocidad, el flujo y la densidad. Estos simuladores no pueden diferenciar entre los vehículos individuales, y por lo general no atender a los diferentes tipos de vehículos. Carecen de la capacidad de modelar vías complejas, características detalladas de control de tráfico o comportamientos diferentes controladores.

Por otra parte, las simulaciones macroscópicas son más útiles para la simulación de sistemas de tráfico de área amplia, que no requieren la modelización detallada, tales como redes de autopistas y redes de carreteras interregionales. Este enfoque no es muy realista, porque en la vida real hay muchos tipos diferentes de vehículos impulsados por diferentes personas que tienen sus propios estilos y comportamientos. Sin embargo, es rápido y puede ser útil y precisa, pero no es adecuado para modelos urbanos.

Simuladores microscópicos modelo de entidades individuales por separado a un alto nivel de detalle, y se clasifican como simulaciones discretas. Cada vehículo se realiza un seguimiento, ya que interactúa con otros vehículos y el medio ambiente. Las normas y reglamentos se definen para controlar lo que puede y no se puede hacer en la simulación, por ejemplo, límites de velocidad, derechos de paso, la velocidad del vehículo y la aceleración. Detalles del flujo de tráfico por lo general asociados con la simulación macroscópica son las propiedades emergentes de la simulación microscópica.

Las simulaciones microscópicas pueden modelar el flujo de tráfico de forma más realista que las simulaciones macroscópicas, debido al detalle en el modelado de vehículos individualmente. Simuladores microscópicos son ampliamente utilizados para evaluar nuevas tecnologías de control y gestión del tráfico, así como la realización de análisis de las operaciones de tráfico existentes.

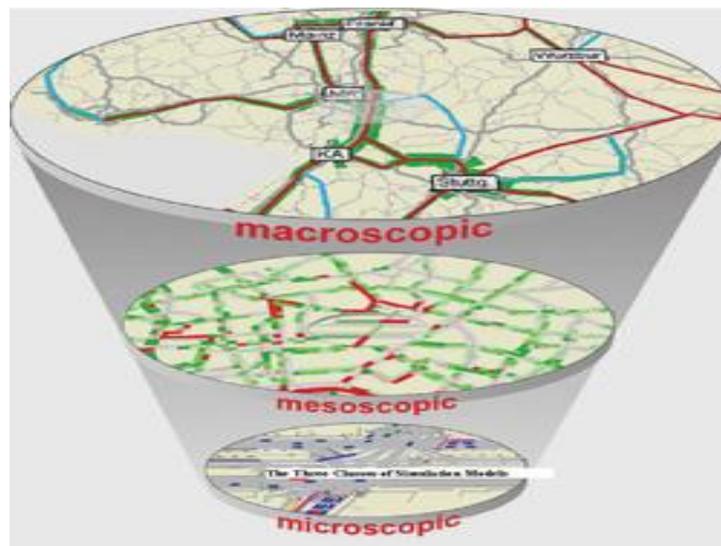


Figura 3.4 Vista de los niveles de simulación del tráfico vial

Existen otras plataformas de simulación como TransModeler y VISSIM, las cuales son por igual atractivas como otra opción alterna al uso de AnyLogic, las mismas son más costosas, pero para efectos de los que en ellas se puede hacer y cómo se puede evaluar su eficacia y rendimiento se puede observar el estudio comparativo realizado por Lu et al. (2010).

En casos muy necesarios, se puede tener un enfoque híbrido de simulación. Esto es, una simulación mixta, para que algunos segmentos de la red vial en cuestión se modelen a nivel mesoscópico o macroscópico, clasificando a las áreas desde las de mayor interés de detalle hasta las de menor detalle. De esta manera, se puede tener una simulación de redes muy extensas con costos computacionales menores.

3.3.5 Simulación de escenarios viales

Muchas ciudades se enfrentan a serios problemas de tráfico vehicular debido al número creciente de vehículos en circulación. Existe un consenso en el tema sobre el tráfico vehicular donde sobre salen varios factores de los cuales los principales es el factor de desarrollo económico y social.

Actualmente, las grandes ciudades de México se enfrentan a diversos retos caracterizados por la congestión vial, los altos costos de movilidad que existen hoy en día, las pérdidas de tiempo en cuanto al traslado que las personas realizan día con día para poder ejercer sus actividades, invasión de espacios públicos, accidentes, contaminación, inseguridad y esto da lugar al rechazo de uso de transporte público por lento y peligroso, lo que vulnera particularmente a los sectores de bajos ingresos, e implica condiciones de exclusión y poca accesibilidad para personas.

Para el modelado y simulación de todo escenario vial, deben ser considerados todos los actores y factores que en él intervienen, estos son los siguientes:

3.3.5.1 Modelando vehículos y conductores

Los actores involucran pares de uno o más de los provenientes de las siguientes categorías:

- Vehículos particulares: vehículos como carros y camionetas, de uso personal o familiar.
- Transporte periférico: que circulan en áreas periféricas de las ciudades.
- Taxistas: vehículos privados de transporte público para pasajeros.
- Colectivos: minibuses o autobuses con capacidad de transportar una cantidad mayor de pasajeros que los vehículos particulares y los taxistas.
- Vehículos escolares: autobuses, minibuses o camionetas que transportan estudiantes.
- Vehículos de seguridad o de emergencia: unidades militares, policiales, bomberos o asistenciales, como patrullas y ambulancias.
- Transporte de carga: desde camionetas hasta camiones de gran capacidad.
- Vehículos motorizados: motocicletas de dos ruedas o de triciclos de motor.
- Ciclistas: bicicletas o triciclos de tracción humana.

Es importante destacar que el modelar vehículos no necesariamente implica considerar al factor humano, cuando este es tomado en cuenta se tiene un nivel de comportamiento superior puesto que entran en consideración factores de toma de decisiones de los conductores entre más como el nivel de educación vial de los mismos que determinan sus prácticas de conducción.

3.3.5.2 Modelando peatones

Según su ubicación geográfica, pueden ser los siguientes:

- Rurales: peatones de veredas y pueblos donde el tránsito automotor es reducido.
- Urbanos: se movilizan en las vialidades de las ciudades, donde el tránsito automotor suele ser intenso.
- Periféricos: de ciertas áreas de las ciudades, donde la vialidad es deficiente debido a que se está a las orillas de las mismas. Se pueden asemejar a los rurales.

Para el modelado de los peatones, se consideran factores que condicionan su comportamiento según las normas de seguridad vial que apliquen.

3.3.5.3 Modelando el entorno

En el entorno vial entra la gran mayoría de los factores involucrados en aspectos de infraestructura vial, para la cual se consideran en esencia los que siguen:

- Vialidades: número de carriles, capacidad máxima tolerable, su longitud y sentidos de circulación, así como posibles retornos. El mal estado de estas puede afectar al flujo vehicular causando congestionamientos.
- Cruceos: número de vialidades que en él se intersectan y si se tienen o no glorietas y restricciones de circulación de vehículos.
- Semáforos: contemplación de los tiempos de cada luz para un mejor flujo de los vehículos.
- Habilitaciones urbanas: pasos a desnivel, túneles entre más como nodos viales.
- Puentes y pasos peatonales: puntos y lugares de cruce que se habilitan para el cruce seguro de los peatones.
- Aspectos climáticos: lluvias, inundaciones y demás fenómenos que pueden afectar de manera temporal al flujo vehicular.

3.4 Definir un flujo vehicular

Analizando los elementos encontrados en las vialidades es posible entender el comportamiento del tránsito, de manera que es posible encontrar los requerimientos para la planeación del proyecto y un buen tránsito en las carreteras. Para observar que tan eficiente puede ser un proyecto al planear una vialidad es necesario observar modelos ya establecidos y de esta forma determinar si es posible tomarlo o crear uno distinto.

Los modelos microscópicos son uno de los más usados debido a que se relacionan diferentes variables como el espacio entre calles, la densidad de tránsito, la velocidad de los vehículos entre otros. Estos modelos tienen la capacidad para poder aplicarse a diferentes tipos de elementos viales. Las tres características principales del tránsito vehicular son: el flujo, la velocidad y la densidad. Al mezclar estas es posible realizar un análisis y de igual manera una predicción de la corriente vehicular, así como las consecuencias y beneficios del proyecto. De estas variables depende mucho la calidad del proyecto, el nivel de experiencia y la calidad para los usuarios de cualquier medio de transporte.

Las variables mencionadas se le conocen también como como volumen, espacio, distancia y tiempo. Estas son solo otra forma de expresar los elementos que incluyen los proyectos de flujo vehicular.

Las variables relacionadas con el flujo son la tasa del flujo, el volumen, el intervalo simple entre vehículos consecutivos y el intervalo promedio entre varios vehículos. Estas se describen como sigue:

- **Tasa del flujo (q) y volumen (q):** la tasa del flujo (q) es la frecuencia a la cual pasan los vehículos por un punto o sección transversal de un carril o calzada. La tasa de flujo es el número de vehículos N que pasan durante un intervalo de tiempo específico T a una hora, expresada en veh/mino veh/seg. No obstante, la tasa de flujo (q) también puede ser expresada en veh/hota, teniendo cuidado con su interpretación, pues no se trata del número de vehículos que efectivamente pasan durante una hora completa o volumen horario (q). La tasa del flujo se calcula entonces con la siguiente expresión: $q = N/T$.
- **Intervalo simple (h_i):** es el intervalo de tiempo entre el paso de los vehículos consecutivos, generalmente expresados en segundos y medido entre puntos homólogos del par de vehículos.
- **Intervalo promedio (h):** es el promedio de todos los intervalos simples h_i existente entre diversos vehículos que simulan por una vialidad. Por tratarse de un promedio se expresa en segundos por vehículo y se calcula de acuerdo a la siguiente expresión: Donde, h: intervalo promedio(s/veh), N: número de vehiculos (veh), N-1: número de intervalos (veh) y h_i: intervalo entre el vehículo.

3.4.1 lógica de control de velocidad y cambio de carril en vehículos

Un grupo separado de parámetros define el comportamiento típico de los conductores con respecto a las deficiencias y velocidad. A saber, hay dependencias de distancia mínima y máxima para el coche de delante como una función de la velocidad y dos correspondientes dependencias

inversas. Esas funciones pueden depender del tipo de coche. La distancia de alerta del parámetro del Carril define con mucha antelación el coche que conduce una ruta, el cual es notificado sobre el cambio de carril necesario.

También hay varios puntos de extensión donde se determinan las acciones personalizadas que se realizan cuando un coche entra en la red, entra en una nueva carretera, etc. las funciones que ayudan al control de velocidad y el cambio de carriles se describen a continuación:

3.4.1.1 Límite de velocidad por defecto, metros / segundo

El límite de velocidad por defecto en toda la red en metros por segundo. Si el camino es curvo, el límite de velocidad se modifica de acuerdo a la velocidad máxima en las curvas. Esto puede ser anulado por un camino particular, llamando `road.setSpeedLimit ()`.

Valor por defecto: 30

3.4.1.2 Velocidad máxima en las curvas, f (radio)

La dependencia funcional de la velocidad máxima en las carreteras de curvas en la radio de camino.

Valor por defecto: $\text{radio} / 2$

Variable local: doble radio - el radio de la curva en metros

3.4.1.3 Distancia mínima, f (velocidad), a pocos metros

La dependencia funcional de la distancia mínima deseada para el coche delante de la propia velocidad.

Valor por defecto: $\text{Velocidad} / 2 + 1$

Variable local: doble velocidad - la velocidad del coche, Coche C - el coche

3.4.1.4 Velocidad máxima que puede tomar el vehículo, f (distancia), metros / seg

Valor por defecto: $(\text{dist} - 1) * 2$

Variable local: doble dist - la distancia con el coche de delante Coche C – coche

3.4.1.5 Distancia máxima, f (velocidad), a pocos metros

La dependencia funcional de la distancia máxima deseada para el coche delante de la propia velocidad.

Valor por defecto: $(\text{velocidad} / 2 + 1) * 1.5$

Variable local: doble velocidad - la velocidad del coche, Coche C - el coche

3.4.1.6 Velocidad mínima, f (distancia), metros / seg

La dependencia inversa exacta de la distancia máxima en la velocidad.

Valor por defecto: $(\text{dist} / 1,5 - 1) * 2$

Variable local: doble dist - la distancia con el coche de delante

3.4.1.7 Distancia de alerta de la línea en metros

Para un coche que lleva una ruta, se define la forma con suficiente antelación para notificar que el auto requiere un cambio de carril.

Valor por defecto: 500

3.4.1.8 Cambio del tiempo, en seg

En un tiempo predeterminado el coche cambia de carril en cuestión de segundos.

Valor por defecto: 1

3.4.1.9 El coche entra en la red de carreteras

El Código que se ejecuta cada vez que un coche nuevo se coloca en la red de carreteras.

Las variables locales: vehículo C - el coche Carretera Forma - la carretera, donde el coche se coloca int laneindex - el índice del carril, doble desplazamiento - el desplazamiento de la parte posterior del coche en ese camino

3.4.1.10 Para elegir la próxima carretera que tomara el vehículo (Shape)

Cuando un coche que conduce sin una ruta, se pide que el código pueda determinar qué camino elegir. Si se evalúa como NULL, se hace una elección al azar.

Las variables locales: vehículo C - el coche CurrentRoad Forma - el camino que se salió int laneindex - el índice de la vía en ese camino.

3.4.1.11 Para entrar a la carretera

Código que se ejecuta cada vez que un coche entra en una carretera.

Sintaxis: void onEnterRoad

Las variables locales: vehículo C - el coche Carretera Forma – la carretera, donde el coche se coloca int laneindex - el índice del carril,

3.4.1.12 Elegir el camino de salida

El código que se ejecuta cada vez que un coche sale de una carretera.

Sintaxis: void onExitRoad

Las variables locales: **vehículo** C - el coche Carretera Forma - la carretera, donde el coche se coloca

3.5 Implementación de semáforos

Se podría definir a un semáforo como un dispositivo eléctrico que puede ordenar el tránsito vehicular, paso peatonal y de otros medios de transporte, esto por medio de una secuencia de colores que en su mayoría de veces son verde, amarillo y rojo cada uno con una función.

La función principal de este dispositivo es comunicar de forma visual el control y flujo de vehículos y peatones en calles y vialidades principales. Alternar los permisos de circulación, regular la velocidad de los vehículos, evitar o disminuir accidentes viales, entre otros.

Un semáforo inteligente puede detectar los vehículos que transitan sobre la carretera mediante sensores y con base a la cantidad de autos que circulan es posible modificar el tiempo de paso o de espera.

Dentro de un esquema de tránsito vehicular, los semáforos son parte importante ya que una buena programación de estos permite conseguir una circulación fluida y a su vez tiempos de espera aceptables para los conductores.

Las principales características que tiene un semáforo que tiene un buen control de tiempos es el siguiente:

Controlador: Este se encarga del cambio de luces en el semáforo. El tiempo de este depende de la programación que se le dé, el cual puede ser fijo o variable.

Ciclo: Es el tiempo que se requiere para completar todas las señales de un semáforo.

Fase: Es una parte del ciclo, es el tiempo que dura una de las señales o luces del semáforo.

Intervalo: Es el tiempo que tarda de cambiar de una señal a otra.

Desplazamiento: Es el periodo de tiempo entre un ciclo de luz verde de un semáforo y un ciclo de luz verde de otro semáforo dentro de una intersección. Esta es la base del control de tiempo en los semáforos.

Intervalo de cambio y despeje: Es el tiempo que tarda en cambiar la luz amarilla a roja. Este intervalo de tiempo permite despejar las vías entre la luz verde y la luz roja, a modo que el nuevo tránsito vehicular sea fluido y pueda circular sin tener autos que puedan estorbar.

Intervalo de luz roja: Es el tiempo que tarda un semáforo en detener la circulación. Esta permite transitar a los peatones en los cruces y a su vez permitir que el flujo contrario pueda despejar un poco la vía antes de dar la indicación de avanzar.

3.6 Simulación de tráfico vehicular basada en agentes

La simulación que es implementada en base a agentes es conocida como simulación multiagente o el modelado basado en agentes. El paradigma agente mapas perfectamente en muchos escenarios de modelado, ya que cada persona en el escenario se puede representar directamente como un agente. Los comportamientos pueden ser programados en los agentes de manera que los individuos se comportan de la misma manera como la entidad que están modelando. Un punto interesante es que los individuos se dan comportamientos simples, y cuando muchos agentes se simulan como grupo, las conductas a menudo emergen que no se programó de manera explícita en los agentes; estos son conocidos como fenómeno emergente.

3.6.1 Sistemas Multiagentes

Un sistema multiagente (SMA) es aquel en el que existe un número de agentes que interactúan en un mismo entorno o medio ambiente. Cada agente es capaz de percibir e influencia parte del medio ambiente; esta área se conoce como esfera del agente de influencia. El entorno puede contener objetos pasivos que sólo puede ser actuado por los agentes y por lo tanto no tienen ningún control sobre sí mismos. En simulación de tráfico basada en agentes, el medio ambiente es la red de carreteras, y los agentes son principalmente los vehículos que pueden afectar a los agentes que los rodean. Funciones de control tales como semáforos también podrían ser modelados usando agentes.

Esto sugiere que la simulación multiagente puede ser una excelente herramienta para el desarrollo de prototipos y modelos de refinación. Debido a que puede permitir que los parámetros de los individuos y el entorno que se varíen fácilmente, es posible experimentar con muchas alternativas y los resultados de ganancia, en tiempo real.

Capítulo 4 Creación de un modelo de tráfico vehicular en AnyLogic

El flujo vehicular se produce en diversos momentos y lugares dadas las condiciones del camino y las decisiones que toman los conductores. Cada conductor al volante, toma la ruta que considera la mejor o la más corta para llegar a su destino. Estas decisiones pueden tomarse dependiendo de la hora del día, la distancia entre un lugar a otro, seguridad en el trayecto o la época del año. Hay momentos donde el tráfico vehicular es denso debido a horas de entrada a las escuelas y trabajos, o bien, puede ser poco por ser de noche o estar en horas de la madrugada. Los usuarios utilizan diversos medios de transporte tales como el automóvil, motocicletas, bicicletas, transporte público, así algunos pueden llegar a ser más rápidos que otros dependiendo de la calidad y velocidad de circulación vial o condiciones actuales del clima.

La simulación de un modelo de tráfico o tránsito vehicular permite tratar de forma más sencilla el comportamiento global a partir de las decisiones individuales y condiciones que pueden presentarse durante un trayecto y de esta manera conocer las características que debe tener una vialidad, carretera o calle. Empleando a la plataforma AnyLogic, se tiene la posibilidad de representar de forma gráfica y bajo modelado 2D y 3D los actores y factores involucrados en un sistema de tráfico vehicular. Aquí será empleada la versión AnyLogic 8 University 8.2.3.

4.1 Biblioteca de tráfico rodado

La plataforma AnyLogic incluye una muy completa biblioteca de tráfico rodado (road traffic library, de su nombre en inglés), la cual permite obtener un nivel físico detallado al momento de planificar, diseñar y simular flujos de tráfico vehicular y administrar sistemas de tráfico vial, como herramienta de planificación de transporte e ingeniería de tráfico vehicular. Los modelos de tráfico vial simulan el tráfico en las calles y carreteras, incluidos los cruceros o intersecciones, los cruces peatonales, las glorietas, los estacionamientos y las paradas de autobús o de transporte público. Según se presume en (AnyLogic, Road Traffic Library, 2018), esta biblioteca es ideal para lo siguiente:

- Modelado explícito del comportamiento de cada vehículo o conductor para representar la dinámica del flujo vehicular en redes viales.
- Respetar las normas de conducción típicas, como lo son el control de velocidad, la elección del carril menos ocupado, las reglas para la combinación de carril, así como el evitar y detectar colisiones.
- Representar cada vehículo como un agente que puede tener sus propios parámetros físicos destacando la longitud, la velocidad y la aceleración, así como sus patrones de comportamiento que se simula con diagramas de flujo que se pueden construir fácilmente.

Capturar el comportamiento es crucial cuando se evalúa el rendimiento de todo el sistema de tráfico.

- Crear modelos 2D y 3D de cada vehículo y su entorno, para que los modelos de tráfico sean flexibles 3D para una mejor visualización.
- Modelar fácilmente cruceros o intersecciones bajo prioridades, semáforos, pasos peatonales, paradas de autobús o de transporte público y estacionamientos.
- Tener un mapa de densidad de tráfico vial para visualizar las congestiones de tráfico vehicular y recopilar estadísticas sobre los flujos de tráfico vial.
- Convertir archivos de sistemas de información geográfica, con los datos de las carreteras existentes, a las formas de marcado de espacios de carreteras de AnyLogic. De esta manera, la red de carreteras se dibuja automáticamente.
- Ampliar el modelo de tráfico vehicular con los elementos de la biblioteca peatonal o de transeúntes (pedestrian library, de su nombre en inglés) (AnyLogic, Pedestrian Library, 2018) y la biblioteca ferroviaria (rail library, de su nombre en inglés) (AnyLogic, Rail Library, 2018) para simular complejos sistemas de transporte, incluidos centros ferroviarios y terminales aeroportuarias.

Las capacidades de esta biblioteca son instrumentales cuando se debe llevar a cabo lo siguiente:

- Planificación de vialidades.
- Evaluar la capacidad y el rendimiento de la red vial
- Manejar el nivel de congestión del tráfico.
- Completar los horarios de los semáforos.
- Integración de edificios públicos en una red vial.
- Soportar varios tipos de automóviles para personalizar su animación y atributos.

Cabe mencionar que por el momento y hasta la fecha en la cual esta sección fue escrita, la biblioteca aquí introducida, no soporta el movimiento inverso de automóviles y carriles para que los automóviles puedan moverse en ambas direcciones. No obstante y con base en el manual de ayuda dado en (AnyLogic, Help AnyLogic, 2017), la misma contiene los siguientes siete bloques que permiten definir el flujo vehicular en un modelo de simulación de tráfico vehicular:

1. Origen o fuente de automóviles (CarSource, de su nombre en inglés): genera autos y los coloca en una ubicación específica dentro de una red vial. Las llegadas de automóviles se pueden definir por tiempos interarrivales, tasa de llegada, cronograma de tasas, horario de llegada o llamadas a la función inject(). Además, se puede limitar el número de arribos.

- a) Si los autos se configuran para aparecer en una vía, la dirección de la vía debe especificarse adicionalmente. Los automóviles aparecerán al comienzo de la ruta especificada y comenzarán a moverse en la dirección especificada. De forma predeterminada, se selecciona el parámetro de carril aleatorio, por lo que los automóviles aparecerán en carriles aleatorios (si hay más de un carril en la vía especificada). Puede especificar explícitamente el índice de carril donde aparecerán los automóviles anulando la selección de la opción de carril aleatorio y utilizando el parámetro de índice de carril.
 - b) Si los autos se configuran para aparecer en una vía, ingresan a la red vial sólo cuando hay suficiente distancia en el carril delante del automóvil. Cuanto más velocidad inicial tiene el automóvil, más distancia se necesita para que un automóvil entre en la red de manera segura. Los automóviles que no pueden ingresar a la red vial de inmediato se acumulan en la cola dentro del bloque CarSource y se retiran de la cola cuando hay espacio suficiente en el carril especificado para colocar un automóvil.
 - c) Si los autos están configurados para aparecer en un estacionamiento, aparecen en espacios libres del estacionamiento especificado y esperan hasta que abandonen la red vial o comiencen a moverse al ingresar en el bloque CarMoveTo. Si todos los espacios de estacionamiento están ocupados, se generará un error.
2. Quitar automóviles (CarDispose, de su nombre en inglés): quita un auto del modelo. Hay varias formas en que un automóvil puede ser removido:
 - a) El automóvil puede moverse por cualquier camino abierto o cuando alcanza la línea de parada especificada, en este caso CarDispose debe seguir al último bloque de CarMoveTo.
 - b) El automóvil se puede quitar de un modelo cuando está ubicado en un estacionamiento o en una parada de autobús. En este caso, no es necesario quitar el automóvil inmediatamente después de que llegue a ellos.
 3. Automóviles yendo a (CarMoveTo, de su nombre en inglés): controla el movimiento del automóvil. Un automóvil sólo puede moverse mientras está dentro de este bloque. Cuando un automóvil ingresa a este, calcula el camino desde su ubicación actual hasta el destino especificado. El destino puede ser una vía, estacionamiento, parada de autobús o línea de parada. Si el destino es una vía, el automóvil primero se desplazará por el camino más corto hasta el comienzo de la carretera y luego avanzará por esta carretera hasta la salida. Si no hay camino desde la ubicación actual del automóvil hasta el destino especificado, el automóvil sale del bloque a través del puerto onWayNotFound.
 - a) Si un automóvil está configurado para moverse a una vía, la dirección de la vía debe ser adicionalmente especificada. El automóvil intentará usar la forma más corta de llegar al comienzo de la vía especificada. Una vez en ella, el automóvil se moverá a lo largo de la ruta especificada hasta el final. Una vez que un automóvil llega al final de la vía, debe

- retirarse inmediatamente del modelo mediante el bloque CarDispose o dirigirse al otro bloque CarMoveTo para enviarlo más. Si un automóvil no puede abandonar el final de la vía de destino inmediatamente, se generará un error.
- b) Si un automóvil está listo para mudarse a un estacionamiento, el automóvil se trasladará al estacionamiento especificado e intentará reservar un espacio de estacionamiento gratuito. Los automóviles reservan espacios de estacionamiento sólo cuando se acercan al estacionamiento. Si un automóvil no puede reservar una plaza de aparcamiento, sale del bloque a través del puerto OutWayNotFound. Si un automóvil puede reservar con éxito un espacio de estacionamiento, se estaciona y sale de este bloque. Un automóvil puede permanecer en el estacionamiento hasta que sea retirado de la red vial o enviado a otro destino por el bloque CarMoveTo.
 - c) Si un automóvil está configurado para moverse a una parada de autobús, el automóvil se moverá a la parada de autobús especificada. Si una parada de autobús ya está ocupada por otro automóvil, el automóvil que se aproxima a la parada de autobús se detendrá en la parada de autobús y esperará hasta que la parada de autobús esté vacante. Cuando un automóvil llega a una parada de autobús, se estaciona y sale de este bloque. Un automóvil puede permanecer en la parada de autobús hasta que sea retirado de la red de carreteras o enviado a otro destino por el bloque CarMoveTo.
 - d) Si un automóvil está configurado para moverse a una línea de parada, son posibles dos opciones de comportamiento en la línea de parada de destino, vea el parámetro Comportamiento en línea de parada para la descripción.
 - e) Mientras el automóvil se mueve bajo el control del bloque CarMoveTo, aún se puede controlar parcialmente utilizando la API Car.
4. Automóviles ingresan (CarEnter, de su nombre en inglés): toma el agente automóvil e intenta colocarlo como un automóvil en la ubicación especificada dentro de una red vial. El automóvil puede aparecer en la vía especificada o en el estacionamiento especificado (definido por el parámetro Aparece).
- a) Junto con CarExit, este bloque se utiliza para modelar parte del movimiento del automóvil en un nivel de extracción más elevado, es decir, sin un modelo de tráfico vial de nivel físico detallado.
5. Automóviles salen (CarExit, de su nombre en inglés): elimina el automóvil de la red vial y pasa el agente automóvil al diagrama de flujo de la Biblioteca de Modelado de Procesos (Process Modeling Library, de su nombre en inglés) habitual donde puede atravesar retrasos, colas, decisiones, etc. Junto con CarEnter, este bloque se usa para modelar parte del movimiento del automóvil en un nivel de abstracción más alto, es decir, sin un modelo de tráfico vial de nivel físico detallado.

- a) Junto con CarEnter, este bloque se utiliza para modelar parte del movimiento del automóvil en un nivel de extracción más elevado, es decir, sin un modelo de tráfico vial de nivel físico detallado.
- 6. Semáforos: simula uno o varios semáforos. El semáforo (también conocido como señal de tráfico, semáforo de tráfico, luz de señalización, luz de frenado) es un dispositivo de señalización ubicado en intersecciones de vías o cruces, pasos peatonales y otras ubicaciones para controlar los flujos de tráfico conflictivos.
 - a) Controla el tráfico vehicular en una intersección especificada o línea(s) de parada.
- 7. Descriptor de redes viales (RoadNetworkDescriptor, de su nombre en inglés): bloque opcional que da acceso al control de todos los vehículos ubicados en una red vial. Permite configurar las acciones que se ejecutarán para cada coche en los siguientes casos: al entrar en la red, al entrar en la vía, al cambiar de carril, etc.
 - a) Este bloque también permite el mapa de densidad vial que muestra el estado actual de los embotellamientos o atascos en las vialidades de la red.

4.1.1 Animación en color del diagrama de flujo en ejecución

AnyLogic anima todos los diagramas de flujo en el tiempo de ejecución del modelo. En la figura 4.1 se puede apreciar que el esquema de colores para la mayoría de los bloques en la ventana del modelo incluye tres colores: plateado, gris oscuro y gris, para distinguir el estado actual del bloque. La paleta donde se localizan los mencionados y descritos bloques se puede apreciar en la figura 4.10.

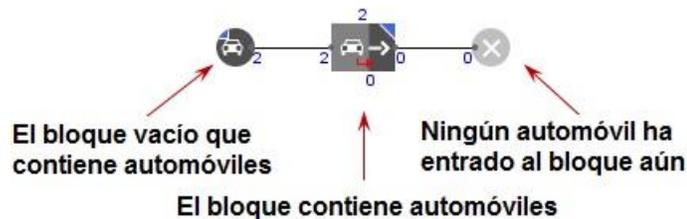


Figura 4.1 Código de animación por color para distinguir el estado actual de un bloque

Por defecto, todos los bloques están coloreados bajo un esquema básico de la siguiente manera (ver figura 4.2):

- plateado: indica que aún no han entrado automóviles en el bloque.
- gris oscuro: indica que los automóviles han entrado en este bloque más temprano, pero actualmente está vacío (es decir, no contiene automóviles adentro).

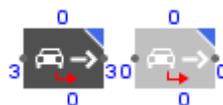


Figura 4.2 Esquema de color básico de bloques

El procesamiento de las acciones de los automóviles que se produce dentro del bloque se visualiza mediante la barra horizontal gris en movimiento dada en la figura 4.3 como sigue:

- Gris oscuro con gris: indica que el bloque actualmente contiene autos dentro y se está procesando una operación.

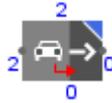


Figura 4.3 Esquema de color complejo de bloques

4.2 Modelando un crucero vial

En esta sección se mostrará cómo se puede modelar el movimiento de automóviles en el crucero vial o vehicular conocido como “Puerto de Chivos”, el cual se encuentra localizado entre los límites de los municipios de Atizapán de Zaragoza y Nicolás Romero del Estado de México, México. Mismo que se encuentra muy cercano al Centro Universitario UAEM Valle de México de la Universidad Autónoma del Estado de México, lugar de formación como ingenieros en computación de los autores de esta tesis.

Aquí, se creará un modelo de tráfico vehicular que se basará en una imagen obtenida y adaptada de la captura de pantalla dada de manera satelital por Google Maps para el mencionado crucero. Esta imagen es la figura 4.4, donde se aprecian todas las peculiaridades de la red vial del crucero. Las vialidades son en su mayoría bidireccionales y contienen uno o más carriles para cada dirección de movimiento. Además, hay semáforos y paradas de autobús o de transporte público. Paso a paso, se considerarán todas estas peculiaridades en el modelo de tráfico vehicular a ser creado, demostrando el uso y aplicación de la mayoría de los bloques o elementos de la biblioteca de tráfico rodado, a medida que se avance en su creación y puesta en marcha.

Para la creación del modelo de tráfico vehicular se debe llevar a cabo lo siguiente:

4.2.1 Crear un nuevo modelo

Para que se pueda crear un nuevo modelo se deben realizar los siguientes pasos:

1. Ir al menú “Archivo” y elegir “Nuevo” para finalmente dar click en “Modelo”, Ctrl + N da el mismo efecto, o bien, presionando el botón “Nuevo” de la barra de herramientas y eligiendo “Modelo”. Con ello, se muestra el cuadro de diálogo “Nuevo Modelo” tal cual aparece en la figura 4.5.

2. Especificar el nombre del modelo. En el cuadro de edición o campo de texto “Nombre de Modelo”, se debe dar dicho nombre. En este caso, se eligió “ModeloTraficoVehicularCruceVialPuertoDeChivos”.
3. Dar la ubicación para guardar el proyecto del modelo. Para fines prácticos, se eligió la que viene por defecto.
4. Definir las “Unidades de tiempo de modelo”, en segundos para los fines del modelo a ser creado.
5. Presionar el botón de “Finalizar” para terminar el proceso de creación del modelo.

Una vez completado el proceso, es posible observar el editor gráfico de la figura 4.6 donde se deben añadir los elementos y bloques a utilizar como componentes. A la izquierda se encuentra el árbol de navegación de proyecto y la paleta de componentes, al centro el lienzo o canvas de edición a manera de una cuadrícula de diseño, y a la derecha se encuentran las propiedades a visualizar de los componentes. El editor gráfico del modelo se puede observar en la figura 4.6.

Desde este momento, ya se tiene un tipo de agente llamado “Main” y un experimento llamado “Simulation”, a los cuales se les cambia el nombre por “Principal” y “Simulación”, respectivamente. Los agentes son los principales componentes básicos de un modelo en AnyLogic. En este caso, el agente “Principal” servirá como el lugar donde se definirá toda la lógica del modelo de tráfico vehicular, ya que sobre él se dibujará la red vial y se definirá el proceso de tráfico vehicular utilizando un diagrama de flujo. La figura 4.6 muestra en el centro del espacio de trabajo al editor gráfico, sobre el cual se puede apreciar al diagrama del agente “Principal”.



Figura 4.4 Imagen satelital del cruce vial “Puerto de Chivos”

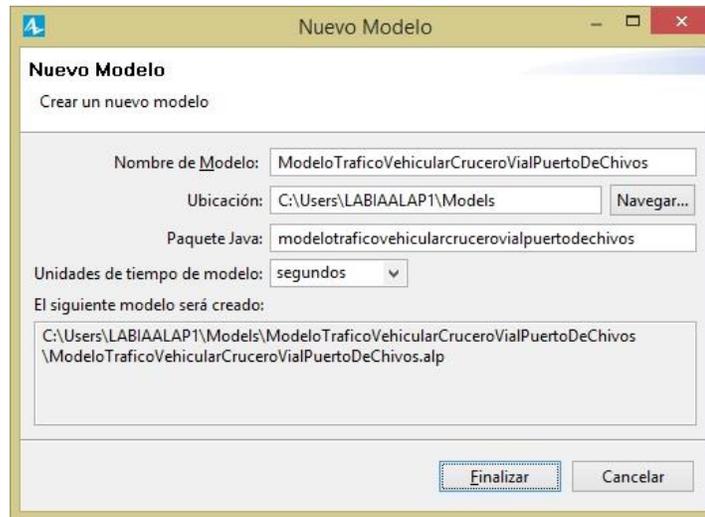


Figura 4.5 Creación de un nuevo modelo de tráfico vehicular en AnyLogic

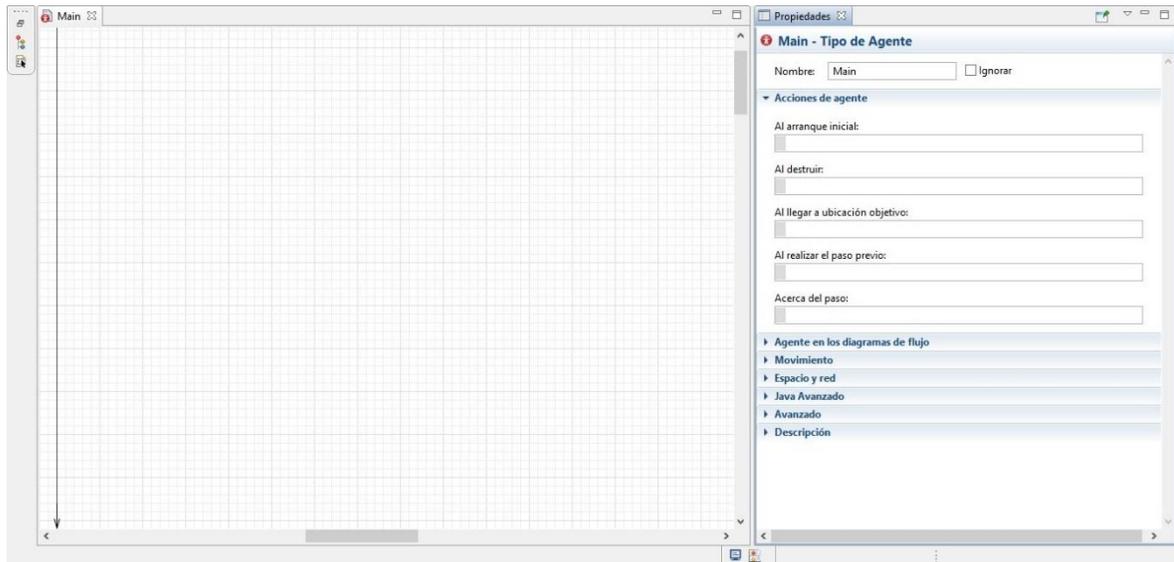


Figura 4.6 Vista de edición del “ModeloTraficoVehicularCruceVialPuertoDeChivos” creado

4.2.2 Agregar un diseño sobre el lienzo o canvas de diseño

La manera de insertar un diseño es rápida y sencilla, sólo se debe hacer lo que sigue:

- Dar click sobre la “Paleta” de components para abrir su vista y elegir la paleta “Presentación” (ver figura 4.7).
- Arrastrar el elemento “Imagen” al lienzo de diseño. Elija el archivo de imagen al momento que el buscador de archivos se abra automáticamente. El archivo elegido para los fines de esta sección corresponde a la imagen satelital mostrada en la figura 4.4. Con ello, se verá la imagen en el editor gráfico (ver figura 4.8).

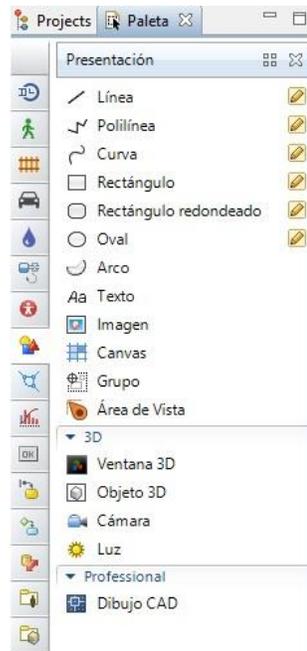


Figura 4.7 Paleta de presentación y sus componentes

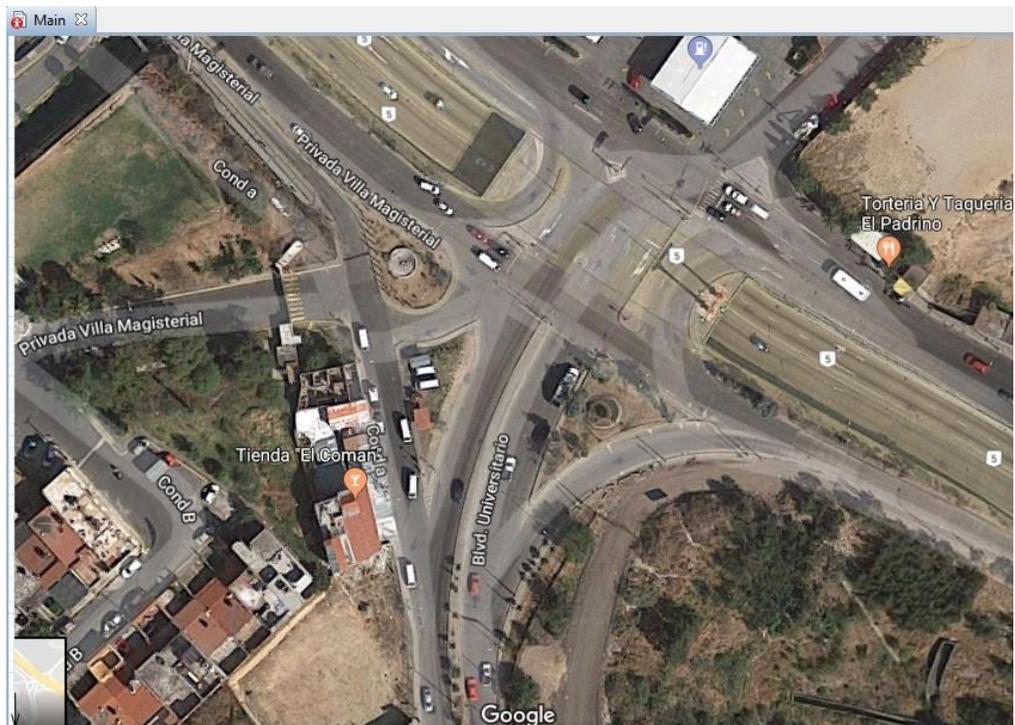


Figura 4.8 Imagen satelital agregada como diseño al lienzo del modelo de tráfico vehicular

4.2.3 Dibujar las vialidades

Ahora se dibujará la red vial, colocando exactamente cada vialidad en el diseño sobre la correspondiente vialidad en la imagen satelital, respetando el sentido de flujo del tráfico vehicular. Antes de dibujar la red, se aconseja apagar la alineación de la cuadrícula en el editor gráfico, haciendo click en el botón “Habilitar/Deshabilitar rejilla” (ver figura 4.9) de la barra de herramientas de la cuadrícula, este debería verse sin presionar. Lo que se debe realizar para dibujar vialidad a vialidad es lo siguiente:

- Desde la vista de la paleta, se debe cambiar a la “Paleta Biblioteca de tráfico rodado”, la cual se muestra en la figura 4.10.
- Hacer doble click en el elemento “Camino” de la “Paleta Biblioteca de tráfico rodado”. Esto significa que el modo de dibujo está activado (ver figura 4.11) y que ahora se puede dibujar la vialidad o camino punto por punto en el editor gráfico de diseño.
- Click en el editor gráfico para dibujar el primer punto de la vialidad o camino (carretera).
- Continuar dibujando segmento por segmento deseado.
- Soltar el botón del mouse cuando se termine de ajustar la forma del segmento de la vialidad.
- Por último, fijar el último punto de la vialidad con doble click (ver figura 4.12).

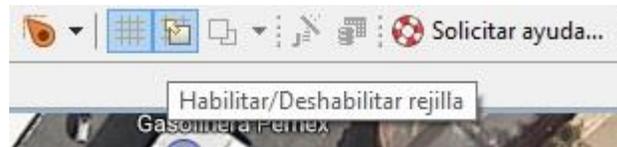


Figura 4.9 Habilitar/Deshabilitar rejilla de la cuadrícula del editor gráfico de diseño



Figura 4.10 “Paleta Biblioteca de tráfico rodado”

En la figura 4.13, se observa que desde la vista de las propiedades de cada vialidad, se podrá decidir su configuración, para especificar si es de un sólo sentido o doble sentido, el número de carriles, entre más como su posición y tamaño.

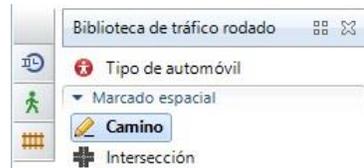


Figura 4.11 Activación para dibujar punto a punto una vialidad o camino



Figura 4.12 Vialidad dibujada para crear la red vial

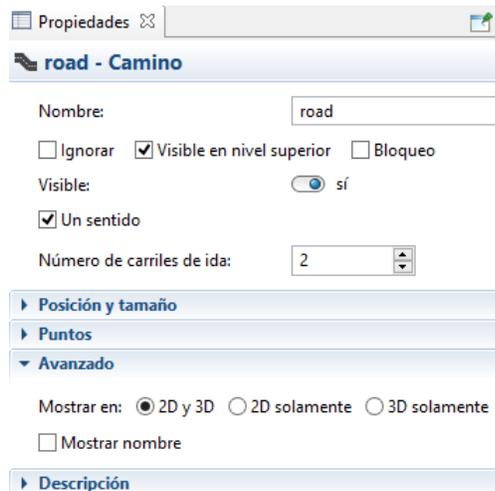


Figura 4.13 Vista de las propiedades de una vialidad o camino

Si es el primer camino o vialidad que se está dibujando en el modelo, aparecerá un mensaje que pedirá que se cambie la escala del modelo a: 4 píxeles por 1 metro. Se recomienda seguir el consejo, ya que la escala ofrecida se utiliza con frecuencia en los modelos típicos de tráfico vehicular. Por defecto, las vialidades se dibujan en dos sentidos con dos carriles para los automóviles que se mueven en una dirección (número de carriles de ida o carriles delanteros) y dos carriles para los automóviles que se mueven en la dirección opuesta (número de carriles de regreso o carriles hacia atrás).

4.2.4 Crear los cruces o intersecciones

Las intersecciones o cruces en AnyLogic se dibujan y crean mediante las siguientes dos maneras:

- Automáticamente al ir dibujando las vialidades. Para ello, se debe mover o jalar el punto de inicio o fin de alguna de ellas sobre otra(s) y hacer doble click cuando se vea un punto cian, lo cual creará una conexión de cruce entre estas. Esta fue la alternativa elegida para la creación de la red vial del modelo presentado.
- Arrastrando y soltando con el mouse el elemento “intersección” de la “Paleta Biblioteca de tráfico rodado” entre dos o más vialidades para unir sus puntos de inicio o fin cuando se vean los puntos cian que servirán como conexión de cruce entre ellas.

La figura 4.14 muestra el cruce o intersección que se generó automáticamente para unir dos vialidades sobre la red vial que está siendo creada. En la misma figura, se pueden ver las propiedades a establecer y configurar para tal cruce o intersección.

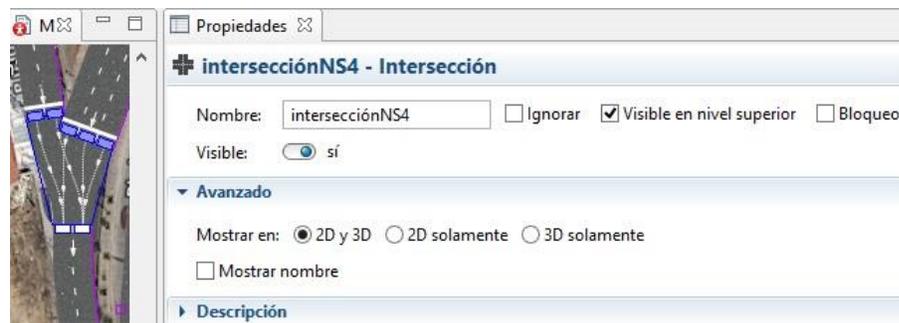


Figura 4.14 Cruce o intersección generada automáticamente para unir dos vialidades

Para configurar la dirección de flujos de circulación de una vialidad a otra a través de un cruce, se debe activar este haciendo click sobre el mismo, para luego visualizar mediante clicks en los cuadros azules, los posibles carriles de unión y continuidad en el cruce a manera de flujos de circulación. Estos flujos pueden ser activados y desactivados mediante clicks, con ello, un flujo a manera de línea continua indica que se activa y uno a manera de línea discontinua indica que se desactiva. Un ejemplo de ello se puede apreciar en la figura 4.15, como un acercamiento dado a lo hecho para un cruce sobre la red vial que se va construyendo.

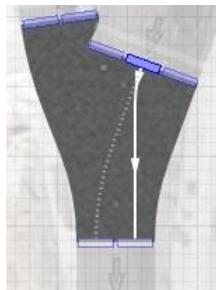


Figura 4.15 Activación/desactivación de los flujos de circulación entre vialidades en un cruce

4.2.5 Agregar estacionamientos

Para perfeccionar un poco más el modelo del cruce vial, es posible modelar automóviles que ocasionalmente se dirijan y detengan por un tiempo en cajones de un estacionamiento.

Los pasos del proceso de creación y dibujo de un estacionamiento son como sigue:

1. Arrastrar el elemento “estacionamiento” de la “Paleta Biblioteca de tráfico rodado” a la vialidad donde se desea quede colocado. Se puede trazar un estacionamiento sólo si la vialidad ha sido dibujada previamente. Al mover el mouse sobre el diagrama del agente, se verá que todos los demás elementos, excepto las vialidades, están ocultos temporalmente, lo cual se refleja en la figura 4.16.
2. Colocar el cursor del mouse al lado de la vialidad justo donde desea colocar el estacionamiento. Se verá que el estacionamiento se conecta a la vialidad de manera automática. Mover el mouse para ubicar correctamente el elemento (el estacionamiento ajustará su forma a la forma de la vialidad) y soltar el botón del mouse cuando se termine. El elemento se colocará en el lugar especificado.
3. Establecer la propiedad “tipo” de estacionamiento: paralelo o perpendicular (ver figura 4.17).
4. Se puede cambiar el tamaño del estacionamiento arrastrando un punto rectangular ubicado en el extremo del elemento con el mouse. Si se hace de esta manera, el estacionamiento aumentará o disminuirá automáticamente el número de espacios de estacionamiento (también se puede especificar la cantidad en la propiedad “Número de espacios de estacionamiento”).
5. La longitud de un espacio de estacionamiento se puede modificar en la propiedad “Longitud del espacio de estacionamiento” (ver figura 4.17). Además de la longitud, el ancho se define en la propiedad “Ancho de carril” de la red vial que aplica a todas las vialidades.
6. Ahora, se puede especificar este estacionamiento como un destino en el bloque CarMoveTo que simula el movimiento de un automóvil hacia el estacionamiento.

Para ajustar la posición de un estacionamiento, lo que se hace es lo siguiente:

- Hacer click en el estacionamiento que se necesita editar.
- Arrastrar el estacionamiento a la posición deseada en la vialidad actual (se debe tener en cuenta que no se puede arrastrar a otra vialidad). Alternativamente, puede moverse modificando el parámetro “Inclinación desde el principio del camino” en las propiedades del elemento, que definirá la posición exacta del mismo.



Figura 4.16 Arrastre y colocación de un estacionamiento sobre una vialidad

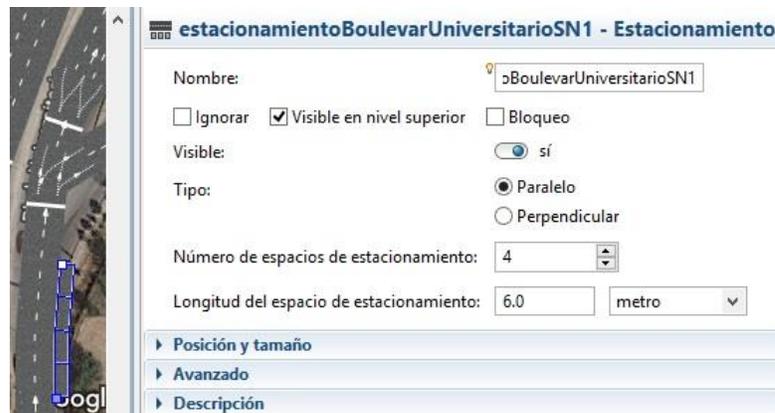


Figura 4.17 Configuración de las propiedades de un estacionamiento sobre una vialidad

4.2.6 Agregar paradas de autobús o transporte público

Usando el elemento de marcado de espacio “Parada de Bus” se puede dibujar una parada de autobús o transporte público, la cual también sirve para automóviles, al costado de una vialidad (en la dirección de desplazamiento del flujo vehicular).

Se debe usar el bloque “CarMoveTo” para modelar el movimiento del autobús hasta la parada deseada. Para modelar la presencia de un autobús en una parada de autobús por un cierto período de tiempo, el bloque “CarMoveTo” debe ser seguido por el bloque “Delay” de la biblioteca de modelado de procesos.

Para insertar y dibujar paradas de transporte público se siguen y ejecutan los siguientes pasos:

1. Desplazar el elemento “Parada de bus” desde la sección marcado espacial de la “Paleta Biblioteca de tráfico rodado” hasta la vialidad deseada. Al mover el mouse sobre el diagrama

del agente, se verá que todos los elementos, excepto las vialidades, están ocultos temporalmente, lo cual se refleja en la figura 4.18.

2. Colocar el mouse al lado de la vialidad justo donde desea colocar el elemento. Se verá que la parada de autobús se conecta con la misma. Mover el mouse para ubicar correctamente el elemento y soltar el botón del mouse cuando se termine. Se puede cambiar su ubicación arrastrándola por la carretera.
3. Es posible cambiar la longitud de la parada del autobús arrastrando el punto del rectángulo ubicado en el extremo del elemento con el mouse o especificando el valor de "Longitud" en las propiedades del element (ver figura 4.19). Además de la longitud, el ancho se define en la propiedad "Ancho de carril" de la red vial que aplica a todas las vialidades.
4. Ahora, se puede especificar esta parada de autobus como destino en las propiedades del bloque "CarMoveTo".

Para ajustar la posición de una parada de autobús, lo que se hace es lo siguiente:

- Hacer click en la parada de autobus que se necesita editar.
- Arrastrar la parada de autobús a la posición deseada en la vialidad actual (se debe tener en cuenta que no se puede arrastrar a otra vialidad). Alternativamente, puede moverse modificando el parámetro "Inclinación desde el principio del camino" en las propiedades del elemento, que definirá la posición exacta del mismo.

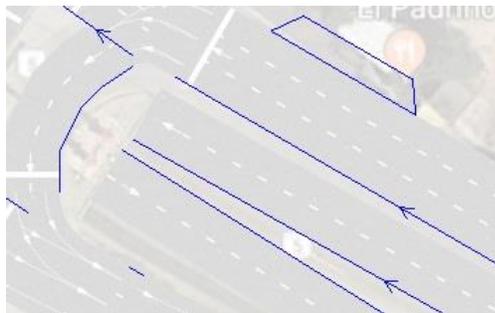


Figura 4.18 Arrastre y colocación de una parada de autobús sobre una vialidad



Figura 4.19 Configuración de las propiedades de una parada de autobús sobre una vialidad

4.2.7 Dibujar la red vial completa

Finalmente, después de dibujar todas las vialidades o caminos, las intersecciones o cruceros, los estacionamientos y las paradas de autobús, así como activar y desactivar los flujos de circulación junto con establecer y configurar sus respectivas propiedades, se tiene por completo creada la red vial, la cual se visualiza casi en su totalidad en la figura 4.20.



Figura 4.20 Red vial completa sobre la imagen satelital del cruceo vial representado

Nota: en caso de que las vialidades sean más estrechas o anchas que las correspondientes sobre la imagen satelital, se debe ajustar la escala del modelo en sus propiedades. Si es necesario, se puede arrastrar el lienzo hacia abajo para ver el elemento "Escala". En este caso y para fines del modelo aquí presentado, se fijó la regla de escala para que correspondiera a 25 metros (ver figura 4.21).

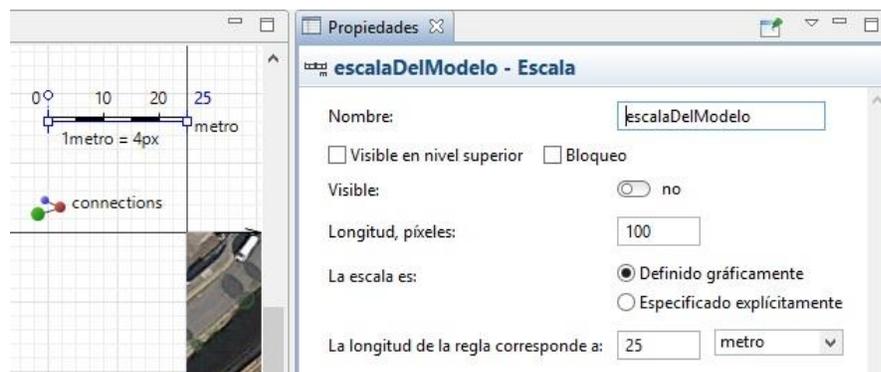


Figura 4.21 Ajuste del elemento escala del modelo creado

4.3 Creación de agentes para representar vehículos

Para el modelo de tráfico vehicular que está siendo creado, únicamente se considerarán como vehículos a los automóviles y al transporte público, dejando de lado otros como motocicletas y bicicletas que también circulan en una red vial.

4.3.1 Agente Automóvil

Para poder crear a este agente, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Abrir la “Paleta Biblioteca de tráfico rodado”.
2. Arrastrar y soltar el elemento de agente “Tipo de automóvil” al editor gráfico.
3. El asistente “Nuevo agente” se abrirá para crear un nuevo tipo de agente.
4. Dar nombre al agente y elegir si será creado desde cero o a partir de una tabla de base de datos.
5. Dar click en el botón “Siguiente” para elegir el tipo de animación seleccionando uno de la lista de elementos “Transporte por carretera”.
6. Dar click en el botón “Siguiente” para que en caso de ser necesario añadir “parámetros de agente”.
7. Finalmente, dar click en el botón de “Finalizar” para concluir la creación del agente

En la figura 4.22 se observa que se decide crear al agente llamado “Automóvil” desde cero. La elección del tipo de vehículo “Transporte por carretera” para animar de manera 3D al agente se aprecia en la figura 4.23.

Una vez creado el agente se

Lo que prosigue para tener varias presentaciones de automóviles de distintos colores y ajustar su tamaño para este agente es lo siguiente (ver figura 4.24):

- Añadir tantas veces el objeto 3D “Auto” de la lista de elementos de “Transporte por carretera” de la “Paleta Objetos 3D” al centro del lienzo de edición del agente.
- Habilitar el botón “Ajustar tamaño automáticamente para coincidir con escala del agente”.
- Dar un nombre al objeto 3D y en el apartado de colores para “Material_4_Surf” especificar el color que se desea tenga el automóvil.

Finalmente, es posible establecer una manera aleatoria de animar a los automóviles en el modelo en tiempo de ejecución, es decir, que aparezcan al azar los mismos de diferentes colores, este se aprecia en la figura 4.25.

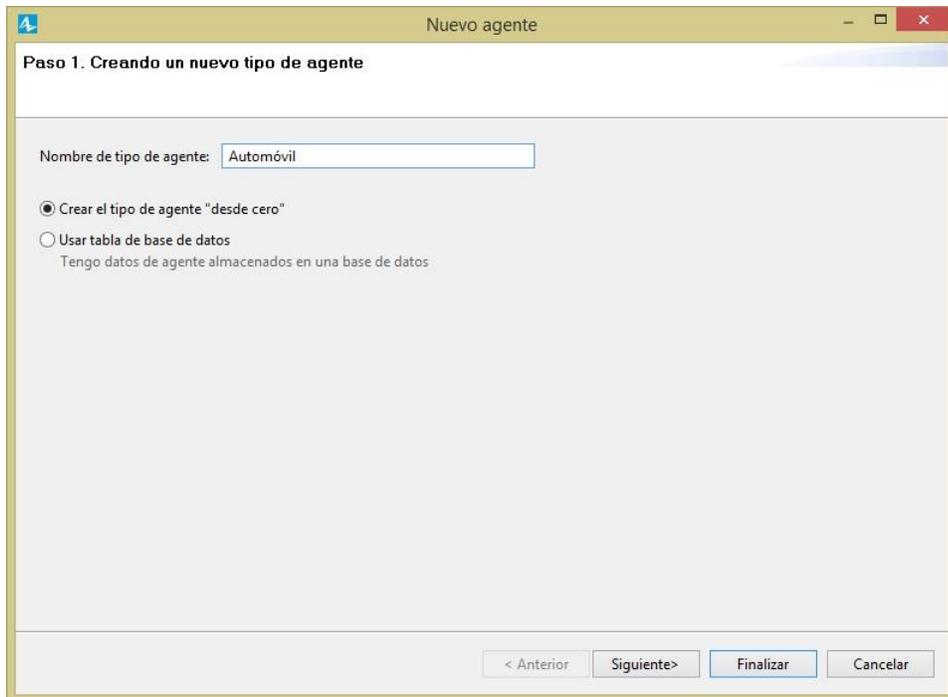


Figura 4.22 Creación del agente “Automóvil” desde cero

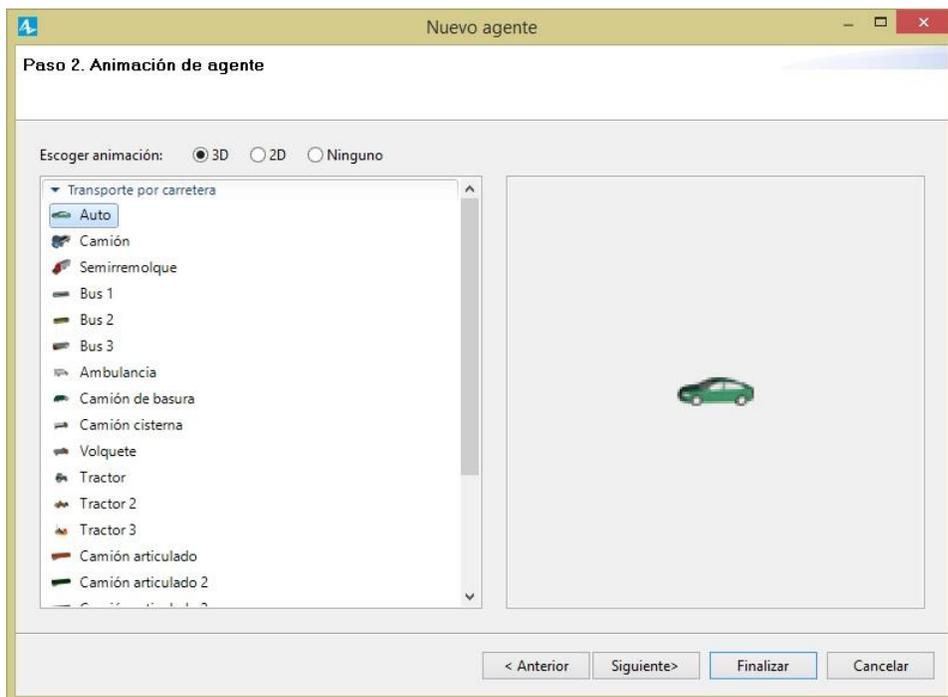


Figura 4.23 Elección de la animación 3D “Auto” para el agente “Automóvil”

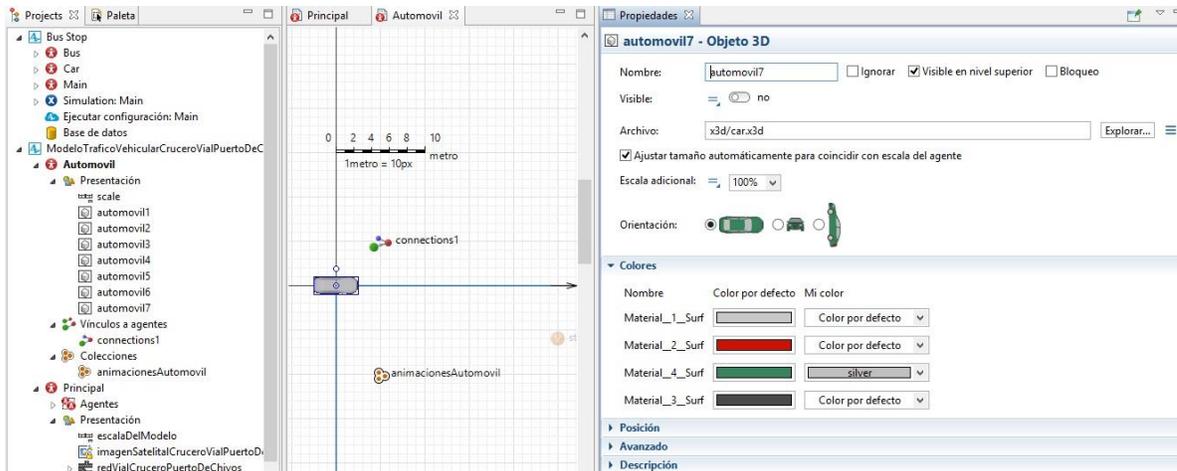


Figura 4.24 Ajuste y configuración de propiedades de la representación 3D del agente “Automóvil”

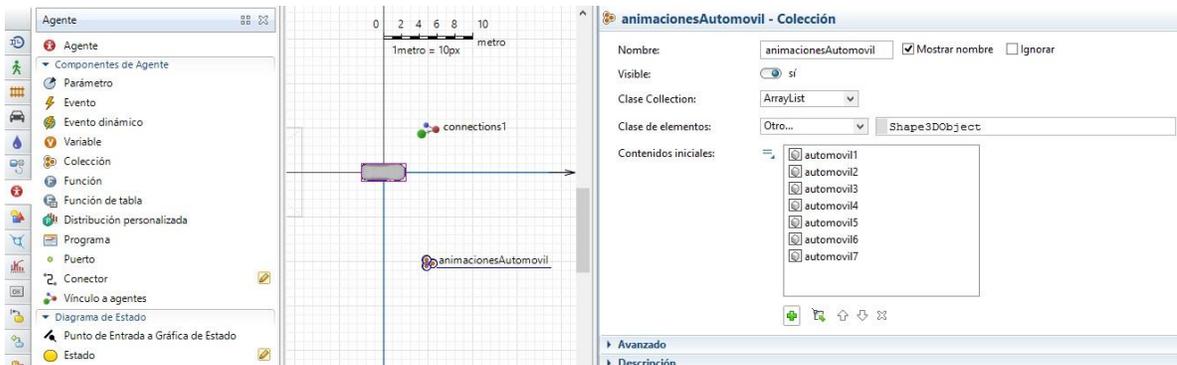


Figura 4.25 Objeto “Colección” para animar aleatoriamente al agente “Automóvil”

4.3.2 Agente TransportePúblico

Siguiendo una manera similar a la usada para poder crear al agente “Automóvil”, el agente “TransportePúblico” puede ser creado. La figura 4.26 muestra lo hecho para este agente y la manera en la cual se logra tener una animación 3D aleatoria del mismo.

4.4 Diagrama de flujo vehicular de la red vial del modelo

El flujo vehicular o vial completo para un modelo de tráfico vehicular se modela y crea con un diagrama de flujo compuesto por bloques de la biblioteca de tráfico rodado. Cada bloque se emplea para definir alguna operación o acción que se realizará con los vehículos que pasen por el mismo.

En AnyLogic se crean diagramas de flujo vehicular agregando y conectando tantos bloques como se requiera de cada tipo de la “Paleta Biblioteca de tráfico rodado” (ver figura 4.10) en el diseño gráfico del modelo de tráfico vehicular que se esté construyendo, conectando bloques entre sí y ajustando sus parámetros.

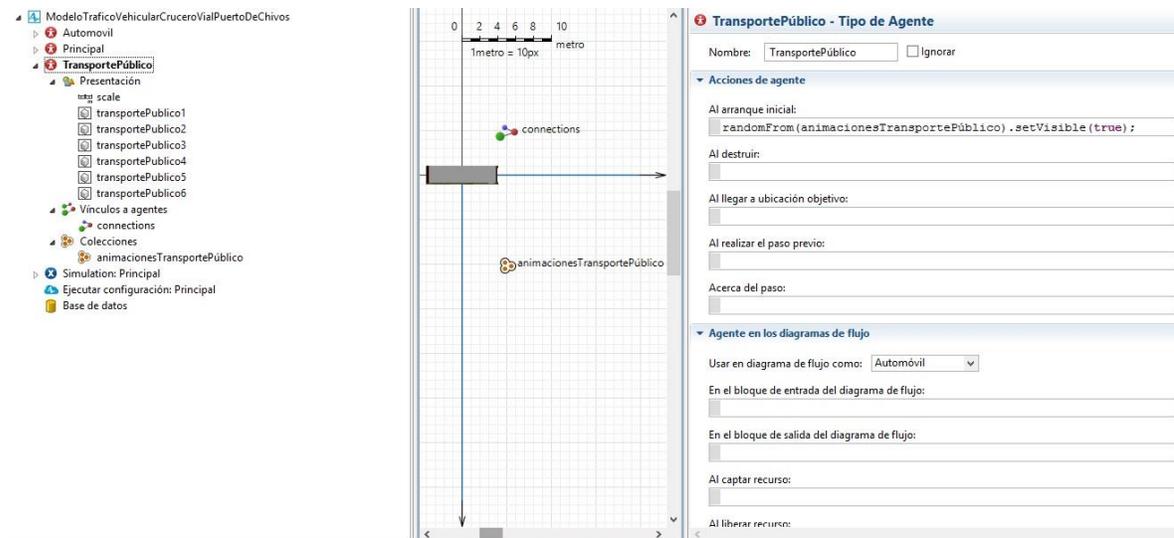


Figura 4.26 Configuración del agente “TransportePúblico”

4.4.1 Crear el diagrama de flujo del modelo

Los pasos para la creación de un diagrama de esta naturaleza son los siguientes:

1. Abrir la “Paleta Biblioteca de tráfico rodado” para agregar sus bloques y construir el diagrama al irlos conectando como se muestra en la figura 4.27. Para agregar un bloque de diagrama de flujo en el diagrama, arrastre el elemento requerido desde la paleta al editor gráfico.
2. Mientras se arrastran y colocan los bloques cerca uno del otro, pueden aparecer las líneas que conectan los bloques a manera de conector. Se debe tener en cuenta que estos conectores deben unir o enlazar sólo los puertos que se encuentran en los bordes derecho e izquierdo de los íconos del bloque.

Cabe hacer mención de detalles adicionales de los tres bloques más usados como sigue:

- El bloque CarSource genera autos. Por lo general, se utiliza como punto de partida del diagrama de flujo para indicar donde aparece y comienza a circular un automóvil sobre la red vial generada.
- CarMoveTo simula y controla el movimiento de un automóvil hacia un destino especificado.
- CarDispose indica el final del diagrama de flujo y descarta los automóviles que llegan del modelo.

Un ejemplo de cómo se verían los tres bloques conectados se da en la figura 4.27.



Figura 4.27 Conexión de los bloques más comunes de la biblioteca de tráfico rodado

Para configurar los bloques del diagrama de flujo se debe seguir lo siguiente:

- Modificar las propiedades de cada bloque, primero se debe seleccionar haciendo click en él en el editor gráfico. Esto abre las propiedades de este elemento en la “Vista Propiedades” (ver figura 4.28).
- Especificar las respectivas propiedades del bloque. especifique con qué frecuencia llegan los automóviles, tales como las referentes a la vialidad o calle, al tipo de automóvil y las acciones.

La configuración para un bloque de tipo CarSource se puede apreciar en la figura 4.28. La figura 4.29 muestra por completo el diagrama de flujo que fue creado para dar la configuración del flujo vial en el modelo de tráfico vehicular generado para representar el cruce vial “Puerto de Chivos”. Lo cual dice que se ha completado la lógica de flujo que define el movimiento de los automóviles a través de las vialidades o calles y cruces o intersecciones.

Nota: con la ayuda de los bloques SelectOutput o SelectOutput5 de la biblioteca de modelado de procesos se pueden dar diferentes rutas de los automóviles en varias direcciones, y con Delay fijar un bloqueo que se usa para modelar el tiempo que los mismos pasarán en los estacionamientos o en las paradas de autobús.

4.4.2 Colocar semáforos

Para que se controle el paso de automóviles a través de una vialidad a otra en los cruces o intersecciones, se deben agregar semáforos al diagrama de flujo. Lo mismo también aplica para los cruces peatonales. El bloque “Semáforo” de la biblioteca de tráfico rodado debe ser empleado.

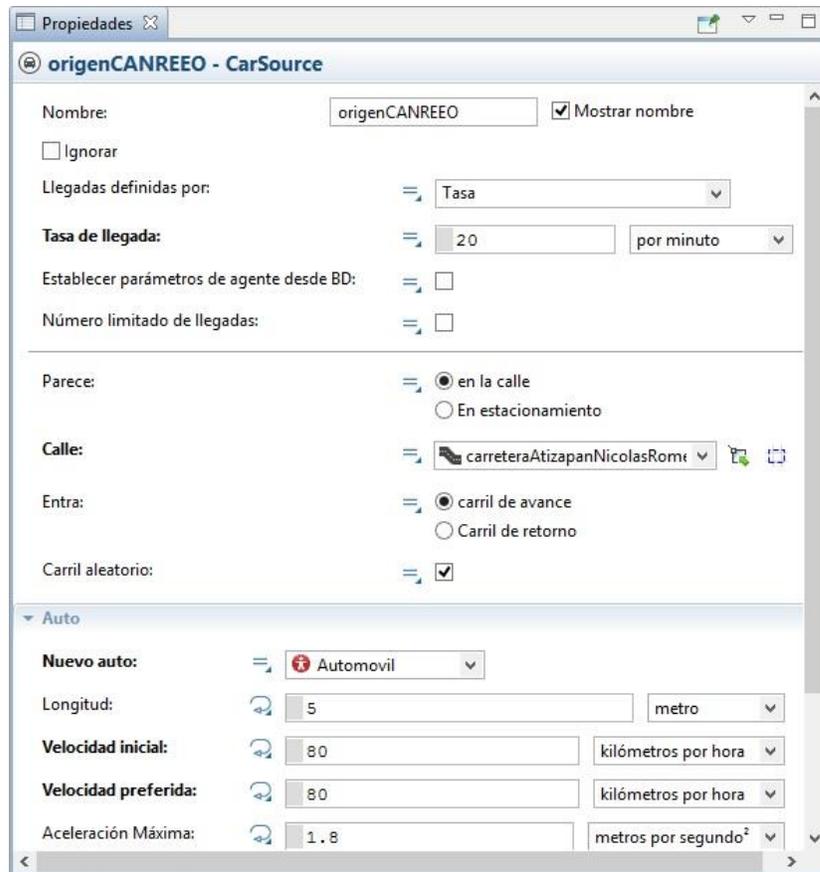


Figura 4.28 Propiedades establecidas para un bloque de tipo CarSource

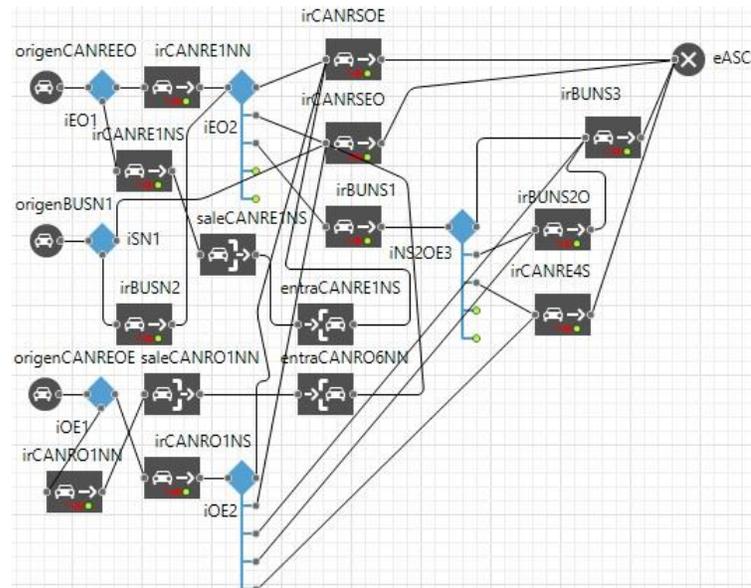


Figura 4.29 Diagrama de flujo vehicular para la red vial creada

Al momento de definir la lógica para los semáforos, se debe trabajar de la siguiente manera y conforme a los siguientes pasos (ver figura 4.30):

1. Añada cada bloque “Semáforo” a un costado o próximo al diagrama de flujo vial desde la sección Bloques de la biblioteca de tráfico rodado. Este bloque no tiene puertos y no es necesario conectarlo a ningún otro bloque del diagrama de flujo vial, aunque puede colocarse en absolutamente cualquier área del editor gráfico.
2. Abrir las propiedades del bloque. Se debe prestar atención al parámetro del bloque principal: “Define el modo para”. Este parámetro tiene tres opciones alternativas, como sigue:
 - a) La opción “Líneas de alto de la intersección”, seleccionada por defecto y la más sencilla de configurar, ya que los semáforos creados por este bloque controlarán el tráfico habilitando/deshabilitando el flujo de tráfico en todos los carriles de la vialidad o camino adyacente al cruce o intersección a la vez. Esta es la que fue empleada en los semáforos del modelo de tráfico vehicular aquí generado.
 - b) La opción “Conectores de vía de la intersección” se usa cuando las direcciones de tráfico permitidas en la intersección controlada difieren para carriles de una y la misma vialidad durante la misma fase de semáforo.
 - c) La opción “Líneas de auto especificadas” es empleada cuando se simulan por este bloque los semáforos que controlan el tráfico en uno o más pasos de peatones, definidos por las líneas de parada de AnyLogic.
3. En el parámetro “Intersección”, elegir el nombre de la intersección a controlar.
4. Establecer el tiempo de duración en segundos de las fases roja, verde y amarilla para las líneas de alto y conectores de vías.
5. En caso de requerirlo, agregar las fases que sean necesarias.

Al seleccionar una celda de la tabla “Fases” del semáforo, se puede ver que todas las formas en el editor gráfico están atenuadas, mientras que las líneas de alto o conectores de vía están marcados en rojo. Lo cual significa que se ingresa al modo de edición de la fase, lo que le permite cambiar fácilmente el estado de cada línea de parada para la fase actual directamente en el editor gráfico, tal cual se ve reflejado en la figura 4.31. El color cambiará de rojo a verde y la celda de la tabla correspondiente en la tabla “Fases” también cambiará al mismo color.

La idea de emplear fases, sus colores y duraciones es para que las fases de semáforo se conmuten entre sí, lo que permitirá el avance o detención del flujo de tráfico sobre un cruce o intersección. Es decir, acorde al respectivo cambio de color de las líneas de parada o conectores de vías de cada semáforo.

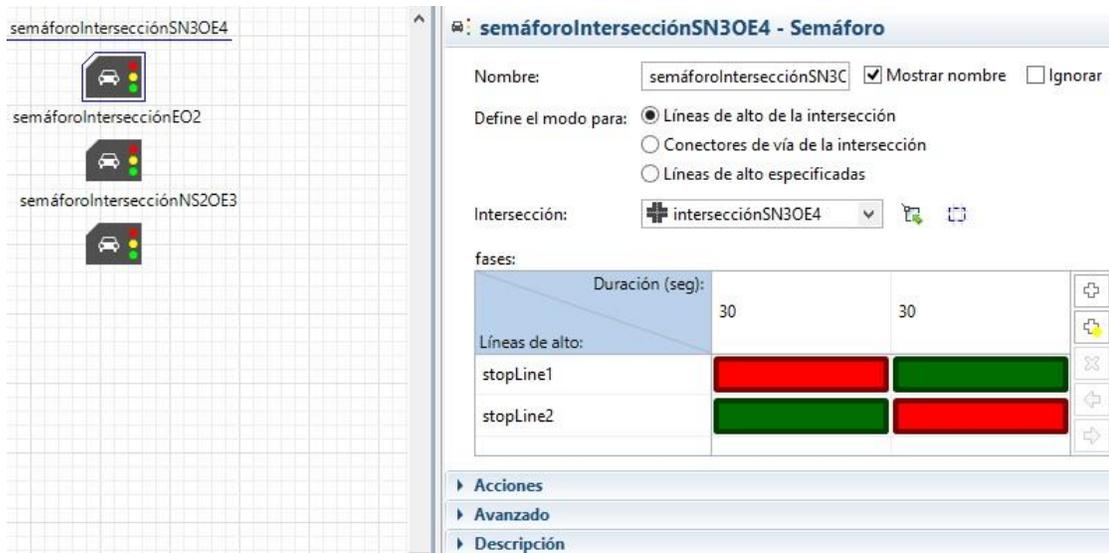


Figura 4.30 Colocación de un bloque “Semáforo” y su configuración de propiedades



Figura 4.31 Cambio de color de una fase de semáforo en el editor gráfico

4.5 Configuración de la red vial

El objeto “Red Vial” crea una red de vialidades con base en los gráficos dibujados en el lienzo de diseño del modelo, comprueba la exactitud de la red y es capaz realizar una animación al ejecutar el modelo. Este objeto debe estar presente en cualquier modelo de tráfico vehicular. No puede haber varias redes viales independientes en el modelo, por cada red debe haber un objeto de este tipo.

4.5.1 Sentido del flujo vehicular

La red vial se construye mediante la búsqueda en profundidad de los segmentos de las vialidades conectados (líneas y arcos). Dos carriles se cuentan como conectados si sus puntos finales están más cerca que la tolerancia de conexión. La dirección de la primera vialidad se determina por la orientación de la forma correspondiente. Para asignar direcciones correctas del sentido del flujo vehicular en una red vial se debe establecer en la propiedad “Tráfico” si es del lado derecho o lado izquierdo. En el caso del modelo de tráfico vehicular aquí creado, dicho sentido debe ser del lado derecho. En países como Singapur este sentido debe ser del lado izquierdo.

El número de carriles en una vialidad se calcula como el ancho de la vialidad en metros dividido por la anchura del carril. Por lo tanto, se deben proporcionar los parámetros de escala que convierten los píxeles en metros y estableciendo el valor de la propiedad “Ancho de carril”. El color de la superficie de la red vial y el marcado se pueden personalizar bajo los parámetros de “Apariencia”.

Recordando a la figura 4.25, esta muestra la configuración dada para la red vial del modelo generado. Para el cual, se estableció para “Ancho de carril” un valor de 3.5 metros y para “Color del camino” la textura “tarmac” que da el efecto de ver reflejada una red vial asfaltada. El resto de las propiedades y parámetros se dejaron con su valor por defecto.

Si todos los elementos y objetos colocados como grupo de formas son 3D, el objeto “Red vial” creará una animación en tres dimensiones, de lo contrario se tendrá una animación en 2D. Cuando se comprueba la opción mostrar en 3D de un grupo de formas, la altura en el eje Z se ajustará automáticamente a 10, lo que podría no ser la altura deseada de las vialidades. La forma más fácil de cambiar la altura en el eje “Z” se realiza en el contenido. Para ello es necesario dar click sobre el objeto de tipo “Red Vial” para seleccionarlo y en lienzo de diseño dar click derecho y elegir “seleccionar caminos” para establecerles a todas las vialidades en el apartado de “Posición y tamaño” el valor del eje “Z” a 10, o bien, al que se necesite según convenga (ver figura 4.32).



Figura 4.32 Valor de altura en el eje “Z” para las vialidades

El objeto “Red Vial” no detecta de forma automática cruces de vialidades, es decir, lugares donde dos caminos se cruzan entre sí y sin conexión, así que si el cruce es de una sola planta, es necesario

tomar buenas decisiones para asegurarse de que no haya colisiones de vehículos al momento del tiempo de ejecución del modelo.

4.5.2 Descriptor de la red vial

Una vez concluido el diagrama de flujo vial, de colocados y configurados los tiempos de las luces de cada fase en los semáforos y de establecido el sentido del flujo vehicular, se puede colocar de manera opcional el bloque “Road Network Descriptor” sobre el lienzo de diseño para que se pueda realizar lo siguiente:

- Establecer la propiedad “Longitud de sección de calle” de la red vial elegida.
- Trabajar con parámetros del mapa de densidad.
- Definir la toma de decisiones sobre distintas acciones en la red vial en tiempo de ejecución del modelo creado.
- Operar con acciones adicionales para resolver conflictos y tener precisión sobre los cálculos.
- Fijar parámetros del tipo de agente que se empleará para representar vehículos sobre la red vial.
- Dar una descripción del bloque.

Para colocar y configurar a este bloque, se debe realizar lo siguiente (ver figura 4.33):

1. Arrastrar y soltar el bloque “Road Network Descriptor” de la “Paleta Biblioteca de tráfico rodado” al lienzo de edición a un costado de los semáforos o bien por debajo del diagrama de flujo vehicular.
2. Seleccionarlo dando click sobre él para activar su edición de configuración.
3. Configurar las propiedades y parámetros del bloque.



Figura 4.33 Descriptor de la red vial del modelo

4.5.3 Mapa de densidad de tráfico vehicular

AnyLogic permite tiempo de ejecución del modelo mostrar el mapa de densidad vehicular o de tráfico vehicular que muestra los atascos o embotellamientos de tráfico actualmente presentes en la red vial

simulada. Mediante el mapa se pintan gradualmente las vialidades en diferentes colores a medida que los automóviles se mueven o desplazan en ellas. El color de cada segmento de vialidad corresponde a la densidad de automóviles actual en él. El mapa de densidad utiliza colores del verde al rojo para mostrar diferentes densidades de automóviles. El color rojo se usa para mostrar segmentos de vialidades con densidades críticas que cuentan con mayor congestión o embotellamiento de tráfico. El color verde se usa para mostrar segmentos de vialidad con tráfico normal.

El mapa de densidad se repinta constantemente de acuerdo con los valores reales: cuando la densidad cambia en algún segmento de vialidad, su color cambia dinámicamente para reflejar este cambio.

Por defecto, el mapa de densidad vehicular no se muestra, pero puede activarse con solo un click en las propiedades de la sección del mapa de densidad del objeto asociado al bloque “Road Network Descriptor” de la red vial. Lo único que se tiene que hacer es seleccionar la casilla de verificación “Habilitar mapa de densidad”. Ahora, si se ejecuta el modelo de tráfico vehicular, se verá que se muestra el mapa de densidad vehicular.

Para configurar y personalizar el mapa de densidad (ver figura 4.34), se sigue y realiza lo que sigue:

- Si no se está satisfecho con el mapa de densidad pintado sobre la animación del modelo ya que es apenas visible, se puede aumentar el nivel de transparencia deslizando la barra de ajuste de la propiedad “Transparencia de Mapa (0..1)” en las propiedades del bloque “Road Network Descriptor” de la red vial. Para el valor dentro del rango [0..1], 0 significa un mapa completamente transparente (el mapa de densidad no es visible), 1 significa un mapa de densidad completamente opaco (la animación debajo del mapa de densidad no es visible en absoluto). El valor de transparencia predeterminado y aceptable es 0.6.
- Personalizar las propiedades “Nivel verde de velocidad” y “Nivel rojo de velocidad” del mapa de densidad. El segmento de vialidad se dibujará en verde si los automóviles pueden moverse en este segmento con su respectiva velocidad definida (o más rápido). Por defecto, el nivel de velocidad verde es de 60 kilómetros por hora y el rojo de 10 kilómetros por hora.
- Ajustar la longitud del segmento de mapa de densidad en la propiedad de “Longitud de sección de calle” del mapa.

4.6 Animación 3D del modelo

Para crear una animación 3D del modelo de tráfico vehicular creado, en primer lugar, se debe agregar una ventana 3D en su diagrama principal. La ventana 3D desempeña el papel de un

marcador de posición para la animación 3D. Esta define el área en el diagrama de presentación donde la animación 3D se mostrará en tiempo de ejecución del modelo.

Para agregar una ventana 3D se realizan los siguientes pasos (ver figura 4.35):

1. Arrastrar y soltar el elemento “Ventana 3D” de la “Paleta Presentación” al editor gráfico.
2. Un área gris aparecerá en la pantalla. Se debe ubicar donde se desea que se muestre la presentación 3D en tiempo de ejecución del modelo. Es buena práctica el colocarla por debajo del diseño del modelo o del diagrama de flujo. En tiempo de ejecución del modelo se podrá navegar en la animación 3D utilizando la herramienta de navegación integrada.
3. Establecer las propiedades, en particular el ancho y la altura en la sección “Posición y tamaño” de la vista de propiedades del elemento “Ventana 3D”.

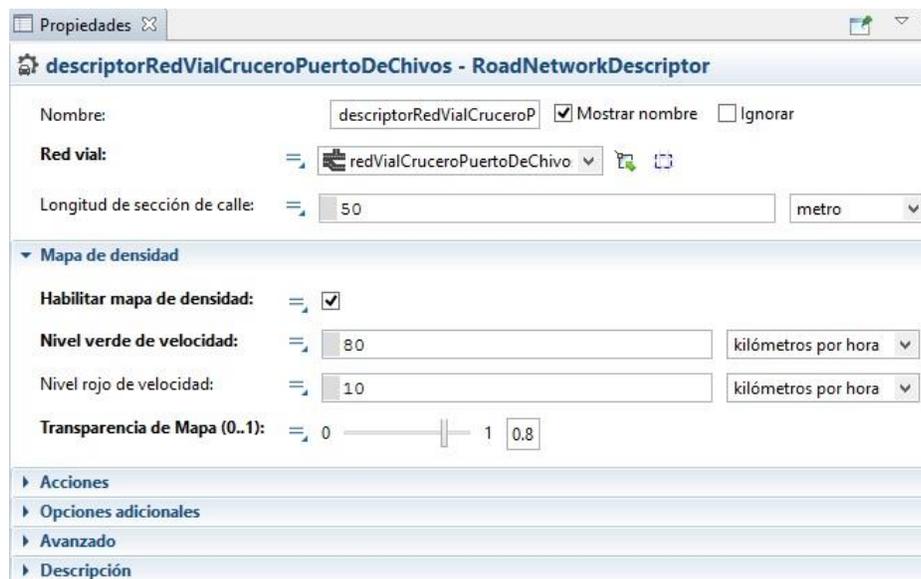


Figura 4.34 Personalización del mapa de densidad vehicular de una red vial

4.6.1 Navegación a través de la animación 3D

Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Ejecutar el modelo de tráfico vehicular (ver figura 4.36).
2. Hacer click en la barra de herramientas y navegar para ver el botón de la vista de área ... y seleccionar “[ventana3D]” (ver figura 4.36).
3. Navegar por la escena 3D usando los comandos que se describen a continuación:
 - a) Mover la escena: presionar el botón izquierdo del mouse en la vista 3D y mantenerlo así para mover el mouse en la dirección requerida.
 - b) Girar o rotar la escena: presionar la tecla Alt (Mac OS: tecla de opción) y mantenerla así para hacer click en la ventana de escena 3D y, mientras se mantienen presionadas las teclas Alt y el botón izquierdo del mouse mover a este ultimo en la dirección de rotación requerida.

- c) Acercar/alejar la escena: desplazar la rueda del mouse en la ventana 3D lejos de o hacia uno mismo.

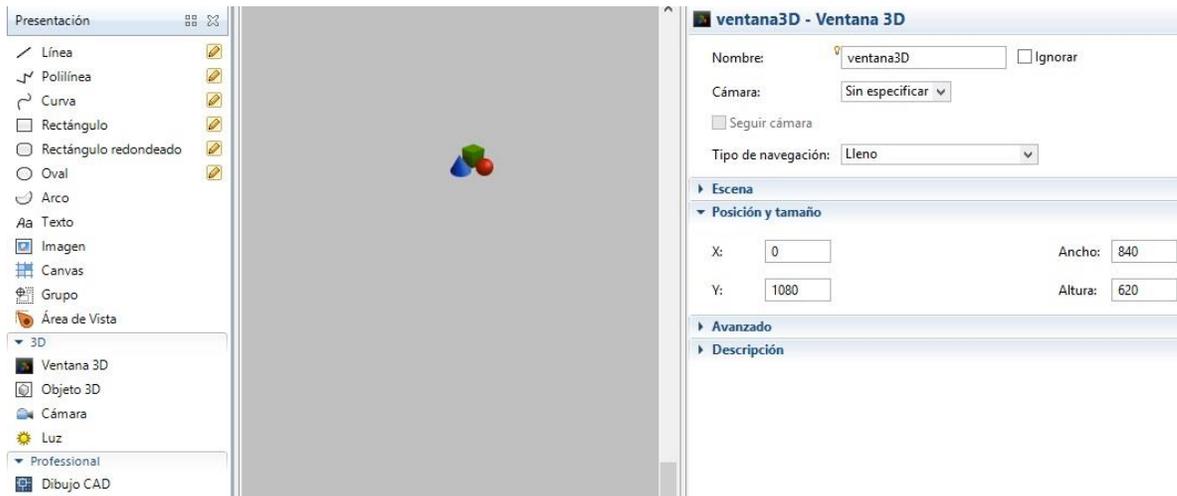


Figura 4.35 Colocación y configuración de una ventana 3D para el modelo

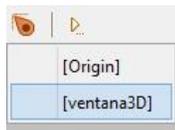


Figura 4.36 Botón de navegación de la vista de área

4.7 Ejecución del modelo generado

Para poder ejecutar el modelo de tráfico vehicular que fue generado para el cruceo vial “Puerto de Chivos” lo que se hace es dar click sobre el botón de ejecución (ver figura 4.37) y al abrirse la ventana de ejecución presionar el botón de “Ejecutar” (ver figura 4.38) lo cual abre la ventana de simulación 2D del modelo.

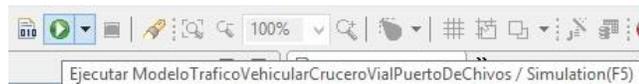


Figura 4.37 Mandar a construir y ejecutar el modelo creado

[ModeloTraficoVehicularCruceoPuertoDeChivos](#)

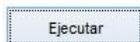


Figura 4.38 Correr la ejecución del modelo creado

La figura 4.39 muestra la ejecución 2D del modelo, en la cual se puede apreciar el mapa de densidad vehicular y en la figura 4.40 se da una vista 3D del modelo en ejecución, apreciándose por igual el mapa de densidad vehicular.



Figura 4.39 Ejecución 2D del modelo de tráfico vehicular y su mapa de densidad vehicular

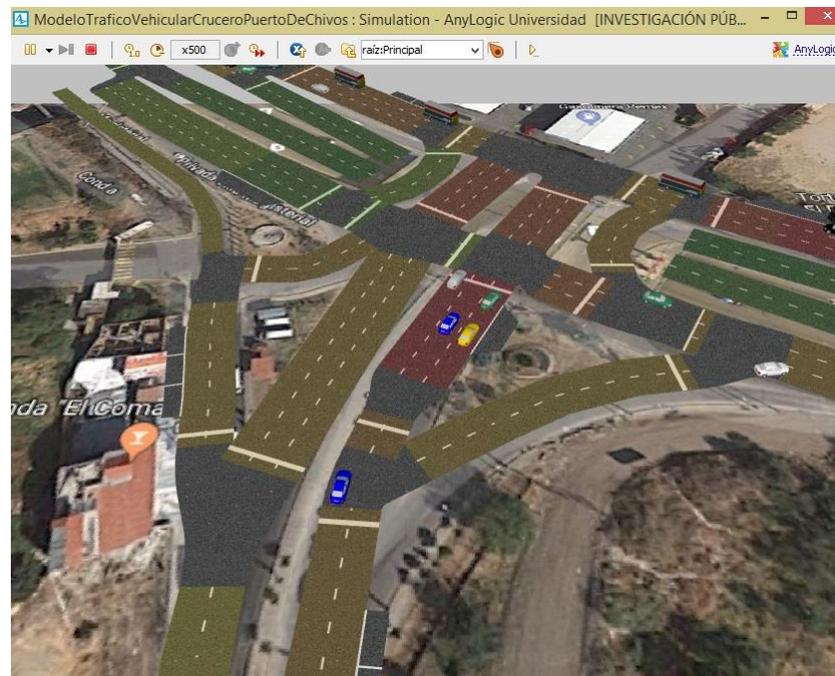


Figura 4.40 Ejecución 3D del modelo de tráfico vehicular y su mapa de densidad vehicular

4.8 Evolución del modelo para representar un mejor escenario 3D

Hasta el momento, lo desarrollado no muestra de forma completa y compleja un escenario virtual realista en 3D, sólo permite apreciar una vista de la superposición de la representación en 3D de los agentes que representan vehículos sobre la imagen 2D del cruce vehicular modelado. Para que ahora se pudiera tener un mejor escenario 3D se buscó respetar al máximo posible lo que existe, converge y diverge en el entorno propio y circundante del cruce “Puerto de Chivos”, con lo cual se modificó y evolucionó el escenario para tener un mejor modelo tal como se aprecia en las figura 4.41 y 4.42.



Figura 4.41 Primera vista de la ejecución en 3D de la evolución del escenario en el modelo

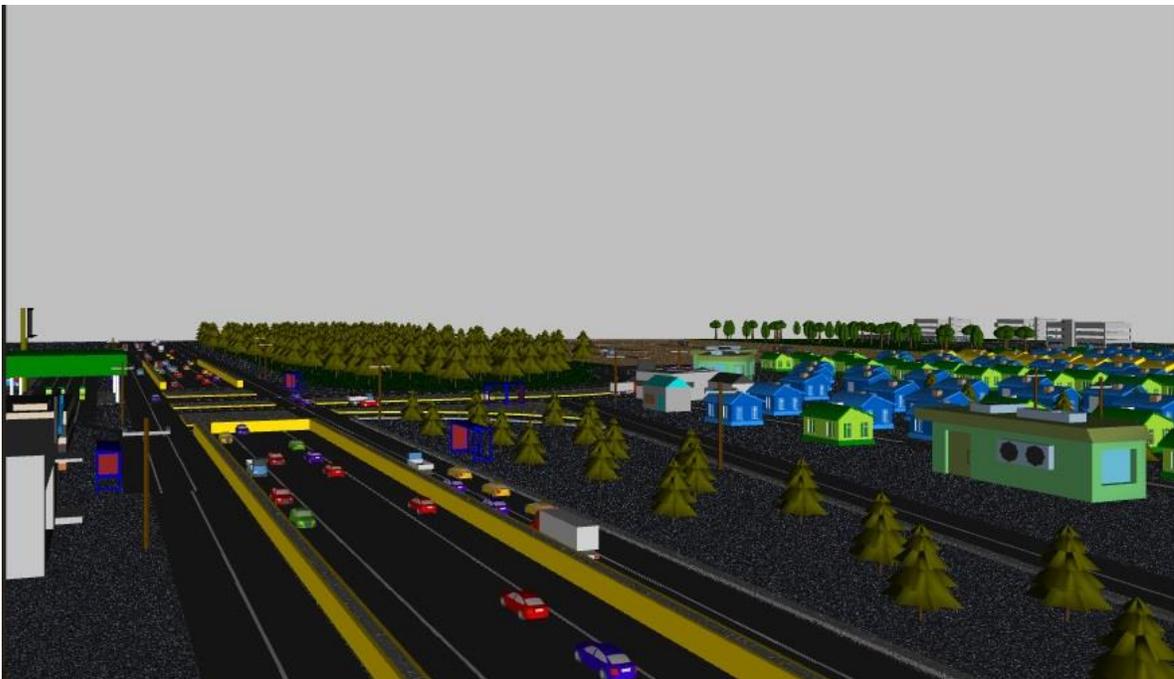


Figura 4.42 Segunda vista de la ejecución en 3D de la evolución del escenario en el modelo

Para poder lograr la evolución y mejora del escenario se recurrió a un proceso similar a lo descrito en las secciones anteriores de este capítulo, para efectos de esta tesis no se describe el cómo fue logrado, sólo se da evidencia de que se hizo.

En la figura 4.43 se aprecia una vista de la ejecución en 2D de la evolución del escenario, dando prueba de que se logró contar con un modelo completo y complejo para representar de manera virtual al cruceo vehicular “Puerto de Chivos”. Esta vista en 2D permite apreciar de una mejor manera el tamaño y elementos del entorno propio y colindante de dicho cruceo vial.

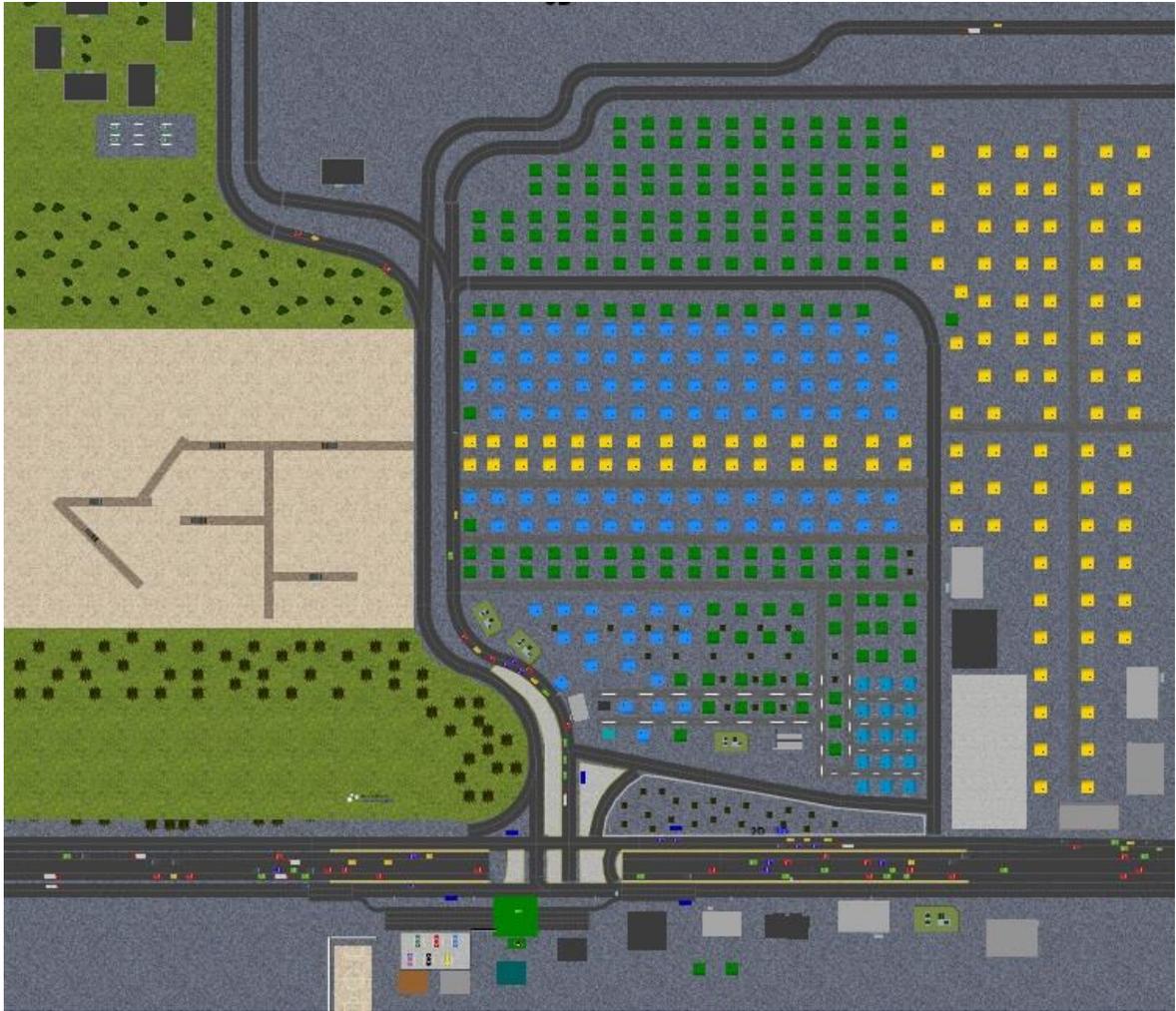


Figura 4.43 Vista de la ejecución en 2D de la evolución del escenario en el modelo

Capítulo 5 Conclusiones y trabajo futuro

Actualmente, los SMA constituyen un área de creciente interés dentro de la IA, debido a la capacidad de adaptación para resolver problemas complejos no resueltos de manera satisfactoria mediante otras técnicas. Uno de los problemas en las grandes áreas urbanas, como lo es la Zona Metropolitana del Valle de México, es la congestión vehicular que se presenta en los principales cruceros en ciertas horas del día. Esto trae consigo un sin número de problemas entre los más comunes se encuentran: el tiempo que pierde un automovilista en trasladarse de un punto a otro, mayores índices de contaminación, fatiga e incluso estrés en los automovilistas.

Lo que se hizo en esta investigación fue estudiar la congestión vehicular de cruceros. Para ello, fue implementando un SMA para estudiar el tráfico vehicular. El SMA se representó como una forma simplificada de la realidad a través de una simulación. Cada uno de los elementos de la simulación fueron agentes autónomos, los cuales permitieron experimentar con un modelo de simulación de tráfico vehicular para el conocido cruce vial “Puerto de Chivos”.

Tomando en cuenta que los efectos y problemas que derivan del tráfico vehicular se encuentran en constante crecimiento, la continuidad de este proyecto de investigación será buscar soluciones y alternativas probadas en escenarios virtuales, que de ser llevadas a cabo en la vida real contribuirían a minimizarlos.

Para enriquecer la simulación y tener una mejor comprensión del fenómeno de tráfico vehicular buscando que se lleguen a dar posibles cursos de acción para su control y reducción, lo que se puede hacer para extender este trabajo es principalmente lo siguiente:

- Crear un escenario para un cruce vial más complejo y extenso.
- Incorporar más tipos de vehículos.
- Permitir ver y apreciar la parte de los peatones y sus relaciones peatón-conductor.
- Emplear la biblioteca de simulación de procesos de AnyLogic para tener una mayor libertad en el comportamiento de los agentes.
- Emplear cámaras a nivel de piso y a manera de drones para tener otras vistas del flujo vehicular.
- Recabar estadísticas de las tasas de congestión.
- Simular a distintas horas del día escenarios más apegados a la realidad del cruce.
- Trabajar con esquemas inteligentes de control de semáforos.

Capítulo 6 Referencias

- Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M., & Cantergiani, C. C. (2010). Instrumentos de simulación prospectiva del crecimiento urbano. *Ciudad y territorio: Estudios territoriales*, 165, 481-496.
- Alonso Sarría, F., & Palazón Ferrando, J. A. (12 de Mayo de 2008). *Modelización de Sistemas Ambientales*. Obtenido de <http://ocw.um.es/ciencias/modelizacion-de-sistemas-ambientales>
- Angélica Lozano, V. T. (2003). Tráfico vehicular.
- AnyLogic. (18 de julio de 2017). *Anylogic*. Obtenido de <https://www.anylogic.com/>
- AnyLogic. (20 de julio de 2017). *Help AnyLogic*. Obtenido de https://help.anylogic.com/index.jsp?topic=%2Fcom.anylogic.help%2Fhtml%2Fmarkup%2FRoad_Network.html
- AnyLogic. (24 de enero de 2018). *Pedestrian Library*. Obtenido de <https://www.anylogic.com/resources/libraries/pedestrian-library/>
- AnyLogic. (24 de enero de 2018). *Rail Library*. Obtenido de <https://www.anylogic.com/resources/libraries/rail-library/>
- AnyLogic. (24 de enero de 2018). *Road Traffic Library*. Obtenido de <https://www.anylogic.com/resources/libraries/road-traffic-library/>
- Bul, A. (2003). Congestión de tránsito.
- Bull, A. (2003). *Congestión de tránsito: el problema y cómo enfrentarlo*. Santiago de Chile, Chile: United Nations Publications.
- Delgado, J., Saavedra, P., & Velasco, R. M. (2011). Modelación de problemas de flujo vehicular. Ciudad de México, México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Fernández, R. (2008). *Elementos de la teoría del tráfico vehicular*. (F. d. Ingeniería, Ed.) Santiago de Chile, Chile: Universidad de Los Andes.
- Fishman, G. S. (1978). *Conceptos y métodos en la simulación digital de eventos discretos*. Limusa.
- Gobierno de Jalisco. (17 de 11 de 2017). *Manual de lineamientos y estándares para vías peatonales y ciclovías*. Obtenido de <https://semov.jalisco.gob.mx/sites/semov.jalisco.gob.mx/files/lineamientosviaspeatonales.pdf>
- Gómez Sanz, J. (2003). Metodologías para el desarrollo de sistemas multi-agente. *Inteligencia Artificial. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 7(8), 51-63. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92501805>
- Grigoryev, I. (2012). AnyLogic 6 in three days: a quick course in simulation modeling. AnyLogic North America.
- Guidorzi, R. (2003). La identificación de sistema de multivariable: de observaciones a modelos. Universidad de Bononia.
- Lozano, A., Torres, V., & Antún, J. P. (2003). Tráfico Vehicular en zonas urbanas. (D. d. Facultad de Ciencias, Ed.) *Ciencias*, 1(70), 34-45.
- Lu, L., Yun, T., Li, L., Su, Y., & Yao, D. (2010). A comparison of phase transitions produced by PARAMICS, TransModeler, and Vissim. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2(3), 19-24.
- Maldonado, C. E., & Cruz Gómez, N. A. (2010). *Modelamiento y simulación de sistemas complejos*. Bogotá, Colombia: Facultad de Administración, Universidad del Rosario.
- Merkuryeva, G., & Bolshakovs, V. (2010). Vehicle schedule simulation with AnyLogic. *12th International Conference on Computer Modelling and Simulation*. IEEE Computer Society.
- Miguel Quesada, F. J. (2015). Simulación Social: Una introducción. Barcelona, España: Laboratorio de simulación de dinámicas socio-culturales de la Universidad Autónoma de Barcelona.
- Peláez, A., & Mejía, S. (2000). Conceptos básicos de modelación matemática y simulación de sistemas biológicos. *CES Odontología*, 13(1), 51-55.
- Pérez, F., Bautista, A., Salazar, M., & Macías, A. (2014). Análisis del flujo de tráfico vehicular a través de un modelo macroscópico. *81(184)*. Dyna.
- Tapias, C. (s.f.). *Sistemas, Modelos y Simulación*. Buenos Aires, Argentina: Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires. Obtenido de Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires: <http://materias.fi.uba.ar/7526/docs/teoria.pdf>

- Tarifa, E. E. (2001). Teoría de modelos y simulación. San Salvador de Jujuy, Jujuy, Argentina: Facultad de Ingeniería.
- Thomson, I. (2000). Algunos conceptos básicos sobre las causas y soluciones del problema de la congestión de tránsito. Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Vilà, I. S., & Robusté, F. (2000). Principios para la micro-simulación del tráfico.