



Universidad
Complutense
Madrid



Facultad
de
Informática

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DEL SOFTWARE E
INTELIGENCIA ARTIFICIAL

MÁSTER EN INVESTIGACIÓN EN INFORMÁTICA

PROYECTO FIN DE MÁSTER EN SISTEMAS INTELIGENTES

CURSO 2009/2010

SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS CONDUCTORES MEDIANTE AGENTES INTELIGENTES

Autor: Alberto Fernández Isabel

Tutor: Rubén Fuentes Fernández

Agradecimientos

Quiero agradecer al tutor de este proyecto, Rubén Fuentes Fernández, el aporte realizado en mi aprendizaje de las tecnologías de agentes, por su interés y ayuda en el desarrollo del prototipo y memoria, y por su paciencia conmigo en las explicaciones. También quiero mencionar a Jorge Jesús Gómez Sanz, ya que con él di mis primeros pasos en el mundo de los agentes inteligentes utilizando la herramienta INGENIAS y gracias a él surgió mi interés por este trabajo.

Dedicatoria

A mis padres, Jesús e Isabel, por el esfuerzo, apoyo e insistencia depositados en mí durante todos estos años, y a todos aquellos que están a mi lado en los buenos y malos momentos.

Resumen

El tráfico y su control es un tema que presenta gran interés en la actualidad dada su influencia en las sociedades modernas. La realización de simulaciones se ha convertido en una herramienta clave para su estudio. Estas simulaciones investigan cómo influyen sobre el tráfico ciertos aspectos físicos y comportamientos de los conductores, así como sus interrelaciones. Ello permite explicar fenómenos que se observan en la realidad y tratar de prever la influencia de ciertas circunstancias.

Existen diferentes aproximaciones para realizar estas simulaciones. Los modelos analíticos se suelen basar en observaciones globales sobre el comportamiento de los sistemas. Tratan de definir los principios generales que los gobiernan y prestan una atención limitada a los componentes individuales. Esta aproximación facilita su escalabilidad, pero al mismo tiempo fuerza a asumir hipótesis simplificadoras a fin de mantener el problema tratable. Por otra parte, los modelos de simulación permiten elaborar propuestas más complejas desde el punto de vista de los componentes individuales. No obstante, las diferencias conceptuales entre los elementos computacionales de la simulación y los conceptos propios del tráfico dificultan su aplicación. Dentro de los modelos de simulación, la simulación basada en agentes emplea abstracciones intencionales y sociales, y por tanto con una cierta similitud con las personas presentes en los estudios sobre tráfico. Ello le permite trabajar con mayor facilidad los aspectos humanos de la simulación, tales como el estado de ánimo de los conductores o su actitud ante el tráfico. Esto conduce a representaciones más fidedignas de la realidad y a la posibilidad de explorar la influencia de factores comúnmente ignorados en este tipo de estudios.

Este trabajo explora las influencias mutuas que aparecen en el tráfico entre el entorno y los conductores. Desde el punto de vista del entorno, se consideran diferentes vías con su influencia en límites velocidad, existencia de cruces o presencia de distintas señales de tráfico. Las vías consideradas son autovías, carreteras secundarias y tráfico dentro de ciudad. El entorno del conductor no sólo lo constituyen las vías, sino también su vehículo. Éste puede influir por ejemplo en la velocidad a la que puede circular o la posibilidad de realizar un adelantamiento. Sobre los vehículos se consideran características como la cilindrada o los caballos entregados por el motor del vehículo conducido. Finalmente, desde el punto de vista del conductor, este trabajo se centra en cómo su actitud ante la conducción y estado emocional influyen en su comportamiento al volante. Este análisis del comportamiento microscópico de la simulación constituye la principal aportación del presente trabajo. Dicho análisis ha permitido obtener conclusiones acerca de cómo el estado psicológico de los conductores afecta a las situaciones que se producen diariamente en las carreteras, y la relación entre algunas variaciones de este comportamiento microscópico y sus efectos macroscópicos en el tráfico.

Palabras clave: Agente inteligente, Comportamiento, Conductor, Estado de ánimo, Simulación, Tráfico, Vehículo.

Abstract

The traffic and its control is an issue of high relevance in modern societies. Simulations have become a key tool for their study. These simulations investigate how the different physical aspects, the drivers' behaviour and their interrelationships influence the traffic. These studies help to explain phenomena observed in reality and try to predict the influence of certain circumstances.

There are different approaches to develop these simulations. Analytical models are usually based on global observations on the behaviour of systems. They try to define the general principles that govern these systems and pay limited attention to the individual components. This approach provides scalability, but at the same time it requires adopting simplifying assumptions in order to keep the problem tractable. On the other side, simulation models allow more complex modelling from the point of view of individual components. However, the conceptual differences between the simulation elements and concepts from the traffic make it difficult to apply them. Among simulation approaches, agent-based simulation is based on intentional and social abstractions, which therefore have a certain similarity with people found in studies on traffic. This facilitates the work with the human aspects of the simulation, such as the drivers' mood or their attitude towards traffic. This leads to more credible representations of reality and the possibility of exploring the influence of factors commonly ignored in this type of studies.

This paper explores the mutual influences that appear in the traffic between the environment and drivers. Regarding the environment, it considers different types of roads and their influence on speed limits, existence of crossroads or presence of various traffic signs. The roads included in this work are highways, secondary roads and cities. The driver environment does not only comprehend the roads, but also the vehicle. This influences, for instance, the speed at which the driver can move or the possibility to overtake another vehicle. Some features considered regarding vehicles are their displacement and the horses provided by their engines. Finally, from the drivers' point of view, this work focuses on how their driving attitude and emotional state affect their behaviour. This analysis of the microscopic behaviour of the simulation is the main contribution of this work. This analysis has led to conclusions about how the psychological state of drivers affects the situations that occur daily on the roads, and the relationship between several variations of this microscopic behaviour and their macroscopic effects on traffic.

Keywords: Intelligent agent, Behaviour, Driver, Mood, Simulation, Traffic, Vehicle.

El/la abajo firmante, matriculado/a en el Máster en Investigación en Informática de la Facultad de Informática, autoriza a la Universidad Complutense de Madrid (UCM) a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a su autor, el presente Trabajo de Fin de Máster: “Simulación del comportamiento de los conductores mediante agentes inteligentes”, realizado durante el curso académico 2009-2010 bajo la dirección del Dr. Rubén Fuentes Fernández en el Departamento de Ingeniería del Software e Inteligencia Artificial, y a la Biblioteca de la UCM a depositarlo en el Archivo Institucional E-Prints Complutense con el objeto de incrementar la difusión, uso e impacto del trabajo en Internet y garantizar su preservación y acceso a largo plazo.

Índice

1. Introducción	15
2. Estado del arte	19
2.1. Características del comportamiento	19
2.1.1. Interpretación de gestos o decisiones del conductor	19
2.1.2. Inferencia del comportamiento del conductor	20
2.2. Simulaciones de tráfico	21
2.2.1. Simulaciones macroscópicas	21
2.2.2. Simulaciones microscópicas	25
3. Prototipo desarrollado	33
3.1. Presentación del prototipo	33
3.1.1. Requisitos del sistema	33
3.1.2. Presentación y funcionamiento del prototipo	34
3.2. Diseño y modelado del prototipo	37
3.2.1. Actuaciones generales	43
3.2.2. Actuaciones útiles	47
3.2.3. Actuaciones específicas	50
4. Pruebas y resultados	53
4.1. Pruebas en autovía	53
4.2. Pruebas en vía secundaria	57
4.3. Pruebas en ciudad	61
5. Conclusiones	65
6. Trabajos futuros	67
7. Referencias	69
8. Glosario	73

Tabla de figuras

- Figura 1: Carga del entorno deseado.
- Figura 2: Selección del número de vehículos.
- Figura 3: Selección del estado de ánimo de los conductores.
- Figura 4: Selección del tipo de vehículo.
- Figura 5: Selección del tipo de simulación.
- Figura 6: Diagrama de clases simplificado.
- Figura 7: Casos de uso de los conductores.
- Figura 8: Entornos del agente conductor.
- Figura 9: Estructura básica de los agentes.
- Figura 10: Tareas y objetivos básicos de los agentes.
- Figura 11: Jerarquía en árbol de los objetivos.
- Figura 12: Diagrama de actividades.
- Figura 13: Inicialización de los conductores.
- Figura 14: Ejemplo de una simulación.
- Figura 15: Evaluación de opción de giro.
- Figura 16: Realización de un aceleración.
- Figura 17: Reducción de la velocidad.
- Figura 18: Realización de un adelantamiento.
- Figura 19: Vuelta al carril derecho más inmediato.
- Figura 20: Cumplimiento del objetivo final del agente.
- Figura 21: Actualización de la percepción del entorno.
- Figura 22: Búsqueda de un objeto a la derecha.
- Figura 23: Búsqueda de un objeto a la izquierda.
- Figura 24: Búsqueda de un objeto en el carril derecho.
- Figura 25: Búsqueda de un objeto en el carril izquierdo.
- Figura 26: Búsqueda de un objeto delante del conductor.
- Figura 27: Búsqueda de un objeto detrás del conductor.
- Figura 28: Realización del paso a través de un ceda el paso.
- Figura 29: Realización del paso a través de un stop.
- Figura 30: Realización del paso a través de un semáforo.
- Figura 31: Realización del paso a través de un cruce.
- Figura 32: Comparación del volumen de tráfico en autovía.
- Figura 33: Comparación de distintas impacencias en agresivos.
- Figura 34: Comparación de distintas impacencias en normales.
- Figura 35: Comparación de distintas impacencias en moderados.
- Figura 36: Comparación entre vehículos rápidos y lentos.
- Figura 37: Comparación del volumen de tráfico en secundaria.
- Figura 38: Comparación de distintas impacencias en agresivos.
- Figura 39: Comparación de distintas impacencias en normales.
- Figura 40: Comparación de distintas impacencias en moderados.
- Figura 41: Comparación entre vehículos rápidos y lentos.
- Figura 42: Comparación del volumen de tráfico en ciudad.
- Figura 43: Comparación de distintas impacencias en agresivos.
- Figura 44: Comparación de distintas impacencias en normales.
- Figura 45: Comparación de distintas impacencias en moderados.

1. Introducción

El tráfico rodado tiene un papel fundamental para la sociedad en la que vivimos, ya que la mayoría de las personas se desplazan utilizando el vehículo particular o el transporte público. Excluyendo el metro y el tranvía, los cuales están solamente presentes en las grandes urbes, los transportes públicos más habituales en las ciudades son el autobús y el taxi. Estos son vehículos normales con conductor, al igual que los vehículos particulares, aunque en ocasiones estén sometidos a algunas normas de circulación particulares.

Debido al impacto que el tráfico tiene en múltiples situaciones de la vida de los ciudadanos, tales como congestiones, contaminación o aparición de zonas propensas a accidentes, es de interés estudiar con atención su evolución, los factores que influyen en él, y sus influencias mutuas. Los entornos de análisis y simulación de tráfico han probado ser una herramienta de gran utilidad para estos estudios.

La mayoría de los trabajos con simulaciones existentes en la actualidad presentan ciertas limitaciones que impiden obtener una visión global de una situación del tráfico. En primer lugar, no plasman toda la variedad de situaciones que pueden aparecer en el tráfico en la vida real ni tampoco muestran cómo evoluciona éste durante un periodo extenso de tiempo. Por ejemplo, muchas simulaciones se centran en obtener resultados sobre ciertos lugares problemáticos para el tráfico, por ejemplo cruces o intersecciones, sin considerar cómo se ven afectadas por el tráfico las calles adyacentes. En otros casos intentan simular el tráfico presente en grandes áreas de terreno para observar la capacidad y fiabilidad de las vías de comunicación, ignorando cómo el comportamiento de conductores en situaciones clave puede alterar el devenir normal del tráfico. Por otra parte, ninguno de estos trabajos realiza una investigación exhaustiva de las carreteras secundarias, siendo estas las que muestran una más que evidente sensación de peligrosidad y una mayor siniestralidad¹. En segundo lugar, otro aspecto también poco explorado en las simulaciones es el carácter o estado de ánimo del conductor del vehículo. Sin embargo, éste es un asunto de vital importancia en las reacciones de los conductores cuando interactúan entre ellos. Una evidencia de este hecho es la distinta valoración que realizan los seguros de la propensión a los accidentes de los distintos tipos de conductores.

Todos los trabajos anteriores se pueden clasificar conforme al tipo de simulación empleado. Existen dos aproximaciones fundamentales: los métodos analíticos y los métodos computacionales, dentro de los cuales se incluye la simulación basada en agentes [Gilbert & Troitzsch, 2005].

Los modelos analíticos tratan de capturar los principios generales que rigen el sistema, realizando una fuerte abstracción de sus componentes individuales [Sewall et al., 2010]. Por ejemplo, utilizan fórmulas de dinámica de fluidos para mostrar el flujo del tráfico. Ello les permite trabajar con sistemas de gran tamaño, aunque a costa de tratar de una manera simplista el nivel microscópico. Estas simplificaciones son necesarias para que la especificación del sistema pueda ser resuelta, y por tanto se puedan conocer los resultados de la simulación. Por ello, su mayor limitación es la dificultad para representar con un cierto nivel de detalle las

¹http://www.dgt.es/was6/portal/contenidos/es/seguridad_vial/estadistica/accidentes_30dias/princip_cifras_siniestral/cifras_siniestralidadl008.pdf

características y toma de decisiones por parte de los conductores. Por ejemplo, es frecuente asignar a cada conductor una ruta predeterminada que éste se limita a cumplir sin más que interacciones básicas con el entorno o con los otros conductores para evitar colisiones. También presentan el problema de ser inadecuados para fenómenos no lineales.

Los modelos basados en programación permiten alterar el compromiso anterior entre principios generales del sistema y la representación de los componentes individuales [Blanchard et al., 1994]. Aquí el problema principal radica en la falta de correspondencia directa entre las entidades computacionales manejadas en la simulación y los conceptos reales del tráfico. Ello hace difícil el modelado y simulación, puesto que los conceptos reales han de ser adaptados a los de la simulación y los resultados de ésta ser interpretados de acuerdo con la realidad que representan. También presentan el problema de la discretización de las actividades de la simulación.

Dentro de estos últimos modelos, la simulación basada en agentes ofrece solución a algunos de los problemas planteados [Gilbert & Troitzsch, 2005]. Los agentes son abstracciones computacionales intencionales y sociales, por lo que guardan una cierta similitud con las personas que participan en el tráfico. Es por tanto factible establecer una correspondencia entre los conceptos de agente y persona, que si bien no son equiparables resultan más próximos que en el caso de otras abstracciones computacionales. Otra ventaja de la simulación basada en agentes es su carácter inherentemente distribuido. Estos modelos presentan una fuerte descentralización en la realización de las actividades. Centrándonos en una visión de los conductores como agentes, cada conductor está encargado de seguir su propia ruta y tiene la capacidad de tomar decisiones en cualquier momento respecto al entorno o al resto de conductores. Por otro lado, es posible establecer normas generales de comportamiento de los agentes, por lo que se pueden representar principios generales del sistema. Tanto las reglas individuales como generales pueden ser fórmulas matemáticas, por lo que soportan la integración con otros tipos de simulaciones. En cuanto a sus limitaciones, cabe indicar que los agentes suelen ser entidades computacionales de una cierta complejidad. Por ello se requiere un compromiso entre el número de individuos en la simulación y su complejidad individual para que el problema sea tratable con los recursos computacionales disponibles. Estos modelos también presentan la limitación de discretizar la simulación, como los otros modelos de programación, pero además requieren discretizar la toma de decisiones. No obstante, son los que mejor permiten representar la realidad en cuanto a comportamiento.

Fruto del análisis de los tipos de simulaciones existentes y varios sistemas concretos, se han identificado una serie de características que no son habitualmente contempladas en los estudios de tráfico, o que no lo son de forma integrada, y que sin embargo pueden resultar relevantes. El presente trabajo persigue ofrecer un entorno de simulación con dichas características. En la sección 2 se realiza una revisión de los trabajos relacionados existentes, mostrando las distintas aproximaciones con las que se investiga el fenómeno del tráfico y el comportamiento humano al volante. En la sección 3 se discute cómo se han abordado en el sistema propuesto en este trabajo algunas de las limitaciones existentes en las simulaciones del tráfico. Concretamente, el sistema desarrollado ha abordado el análisis integrado de diferentes tipos de vías, vehículos y conductores. La sección muestra el funcionamiento del sistema creado y cómo simula de manera descentralizada los comportamientos humanos a bordo de un vehículo, a la vez que es flexible para crear nuevos entornos y elementos exteriores

que influyen en el tráfico. Este sistema consta de una aplicación gráfica capaz de generar una simulación a partir de su especificación XML. Dicha especificación describe: el entorno incluyendo los tipos de vías, su distribución y señales de tráfico; los parámetros de comportamiento de los agentes inteligentes que simulan a los conductores, centrados especialmente en su carácter; y el tipo de vehículo utilizado por los distintos agentes, con sus características de cilindrada y velocidad máxima. La sección 4 plasma los resultados de una serie de experimentos realizados con el sistema sobre la influencia en el tráfico del estado de ánimo de los conductores, las características del motor del vehículo conducido y el entorno por el que circulan. En la sección 5 se muestran las conclusiones obtenidas y finalmente en la sección 6 se presentan una serie de mejoras a tener en cuenta en futuros trabajos.

2. Estado del arte

En esta sección se analiza el contexto del trabajo actual en cuanto a aproximaciones y trabajos existentes. Este análisis considera dos perspectivas fundamentales. Primeramente se tratan aquellos trabajos que se centran en el análisis del comportamiento humano al volante, intentando establecer cuáles son las características relevantes de una persona y su estado respecto a la conducción, y cómo determinarlos y evaluarlos. El segundo grupo de trabajos corresponde a simulaciones de tráfico, clasificando los distintos objetivos perseguidos en ellas y teniendo en cuenta tanto el comportamiento de conductores individuales como de grupos de conductores.

2.1. Características del comportamiento

La mayoría de los trabajos relacionados con el estudio del comportamiento de las personas al volante utilizan una serie de sensores o instrumentos de captación de datos, para después aplicar fórmulas matemáticas o físicas para la obtención de conclusiones y datos sintetizados. Las investigaciones más importantes realizadas sobre el comportamiento de los conductores hasta la fecha elaboran los perfiles de los mismos de dos maneras distintas: mediante la interpretación de gestos o decisiones del conductor, o mediante la inferencia del comportamiento del mismo a partir de datos procesados.

2.1.1. Interpretación de gestos o decisiones del conductor

Para la interpretación de las decisiones de los conductores se suele utilizar la información de las actuaciones de estos sobre los distintos controles del vehículo y la recogida de diferentes señales físicas que generan durante la conducción. Existen diferentes propuestas al respecto.

Una primera posibilidad es considerar la presión ejercida en los pedales del freno y del acelerador, consiguiendo identificar unívocamente las maniobras realizadas por cada conductor. Por ejemplo, en [Wahab et al., 2007] se utiliza un controlador de articulación de modelo cerebelar (CMAC) para manejar la información recibida de los sensores colocados en los pedales y obtener información sobre la agresividad de los conductores. Con esta información se elabora un perfil de comportamiento que permite determinar el estado de ánimo del conductor: los conductores que presionan con más fuerza y asiduidad los pedales se identifican como más agresivos, mientras que los que realizan presiones menos potentes y repetitivas sobre estos como más moderados. Actualmente se está intentando no solo identificar con precisión la emoción del conductor, sino también poder predecir eventualmente las emociones del mismo. Esta información emocional sobre los conductores resulta relevante en las simulaciones de tráfico porque afecta a su forma de conducir.

Otro trabajo similar al anterior [Malta et al., 2009] se centra en la frecuencia de utilización del pedal de freno y la presión ejercida sobre él junto con la gesticulación del conductor. Esta información permite a los autores inferir el tipo de comportamiento del conductor e identificar situaciones potencialmente peligrosas. El trabajo persigue analizar las causas y efectos concretos detrás de la afirmación estadística de que tres de cada cuatro accidentes se producen por un fallo humano, el cuál es normalmente una pérdida de concentración al volante. Los resultados obtenidos en este trabajo indican que hay una relación directa entre el

comportamiento de los conductores y los factores externos a los que se enfrentan, como pueden ser congestiones de tráfico, vías con poca visibilidad u otros conductores que circulen cerca. Se puede afirmar que las zonas potencialmente más peligrosas son aquellas que exigen un alto grado de concentración a los conductores, tales como zonas en las que es frecuente realizar frenazos bruscos.

Las conclusiones obtenidas en estos trabajos sientan algunas de las bases más importantes de este proyecto. En concreto, estos trabajos indican que el comportamiento de los conductores no es sólo función del tráfico, sino también de su estado de ánimo y actitud frente a las circunstancias de la circulación.

2.1.2. Inferencia del comportamiento del conductor

La mayoría de los trabajos que abordan la inferencia del comportamiento del conductor intentan predecir maniobras simples que estos llevan a cabo. Las maniobras concretas y cómo se realiza dicha predicción cambian según los estudios.

Uno de los trabajos más relevantes en este campo es un sistema capaz de anticipar cuando un conductor va a realizar un cambio de carril [Tezuka et al., 2006]. Este trabajo considera varios tipos de maniobras:

- Permanencia en el carril actual.
- Cambio normal al carril más próximo.
- Cambio de emergencia al carril más próximo.

Además trabaja con varios perfiles de comportamiento de los conductores, realizando una clasificación jerárquica en cuatro niveles:

- Nivel 1: Dominio de las maniobras del vehículo. Función ejecutiva.
- Nivel 2: Manejo de las situaciones del tráfico. Función específica de la situación.
- Nivel 3: Objetivos y contexto de la conducción. Función específica del dominio del tráfico.
- Nivel 4: Objetivos durante la vida y habilidades desarrolladas. Función independiente del dominio del tráfico.

Aunque el trabajo es destacable en cuanto a su capacidad de predicción, la utilidad práctica de este resultado es limitada: no es necesario instalar un sistema de este tipo en un vehículo, puesto que la mayoría de los conductores suelen percibir por sus propios medios cuando otro conductor va a realizar una maniobra de cambio de carril. Los perfiles de comportamiento que utiliza son sin embargo de gran interés para el presente proyecto, ya que pueden ser fácilmente extrapolados a otros trabajos que basen sus análisis en el comportamiento de los conductores. Todos los conductores son representados en la simulación con un dominio de las maniobras del vehículo y una serie de habilidades específicas desarrolladas, pero sin embargo no todos manejan de la misma manera las distintas situaciones del tráfico que se pueden producir.

Otros trabajos analizan e infieren el comportamiento mediante múltiples sensores y modelos de Markov. Por ejemplo, en [Sathyanarayana et al., 2008] se utilizan las presiones sobre los pedales, como en los trabajos del apartado anterior, aunque en este caso se centran en la inferencia de comportamientos y las posibles rutas tomadas por el conductor. Principalmente anticipan los cambios de carril, los giros, la posición del vehículo y el estado de ánimo del conductor utilizando señales biométricas. Muestra una clasificación bien detallada tanto del contexto de la conducción (Ej. entorno, ruta y tipo de maniobra), como del estado del conductor

(Ej. distraído, neutral, agresivo y adormilado). Estas clasificaciones presentan algunas deficiencias, tales como la gran similitud que existe entre el comportamiento del conductor distraído y el adormilado. No obstante, estas clasificaciones son una base para futuros trabajos basados en el comportamiento de los conductores, ya que permiten la obtención de perfiles de comportamiento. En este proyecto, la clasificación de los conductores es más general (con menos perfiles). No obstante, las ideas presentes en el trabajo referido se tienen en cuenta para futuras mejoras, por ejemplo para considerar como afecta a las capacidades del conductor estar o no distraído.

2.2. Simulaciones de tráfico

Las simulaciones de tráfico se pueden clasificar según dos perspectivas ortogonales. Atendiendo a la perspectiva sobre el tráfico, pueden ser macroscópicas y microscópicas. Las primeras tienen la ventaja de permitir estudiar entornos más grandes. No suelen realizarse con agentes inteligentes y cuando es así, estos no disponen de una inteligencia relevante. Las segundas permiten estudiar el efecto de los comportamientos individuales en el tráfico. Nótese que en todos estos casos la literatura suele referirse a las abstracciones computacionales que representan a conductores o vehículos como agentes (inteligentes). Sin embargo, el presente trabajo distinguirá como sistemas basados en agentes aquellos en los que dichas abstracciones tienen el carácter intencional y social propio del paradigma de agentes [Weiss, 2000].

Atendiendo a los recursos computacionales que necesitan para su ejecución, ambos tipos de simulaciones pueden clasificarse también como distribuidas o no distribuidas en varias máquinas. Se requieren simulaciones distribuidas cuando los recursos computacionales involucrados son muy elevados para una sola máquina, por ejemplo por el elevado número de elementos en la simulación o de operaciones máquina realizar. Entre las dos clasificaciones anteriores, la más relevante para el presente proyecto es la primera.

Las simulaciones revisadas en esta sección se han empleado para determinar las características útiles para modelar el tráfico y realizar su simulación. Además, han permitido establecer potenciales formas de plasmar estos elementos en los entornos de simulación. También muestran las limitaciones de los sistemas actuales para este propósito y sus posibles mejoras.

2.2.1. Simulaciones macroscópicas

Este tipo de simulaciones, como se dijo anteriormente, se emplean en la representación de grandes áreas de terreno. Habitualmente se trata de ciudades o zonas conflictivas en la vida real por las que circula una cantidad elevada de vehículos. Estos vehículos no suelen disponer de un conductor con capacidad de decisión individual. Es decir, los vehículos se limitan a seguir una serie de leyes físicas o matemáticas globales que determinan su actuación. Dentro de este tipo de simulaciones resulta de interés considerar la división entre no distribuidas y distribuidas, ya que es aquí donde más asiduamente aparecen ambos tipos. En particular, cuando en estas simulaciones se utilizan elementos computacionales con cierta inteligencia para dotar al conductor de alguna capacidad de decisión, las simulaciones suelen ser distribuidas, debido a la gran cantidad de recursos que necesitan.

Comenzando con las simulaciones no distribuidas, están aquellas basadas en el aprendizaje dinámico a través del tiempo. Un ejemplo de estas es [Balmer et al., 2004]. En este trabajo, el sistema comienza con unas condiciones iniciales y conforme el tiempo avanza los módulos mentales de los agentes obtienen nuevas estrategias para el futuro basándose en los hechos que ocurren en la simulación actual. Estas nuevas estrategias intentan simular el aprendizaje de los conductores en la vida real día tras día. Después del aprendizaje la simulación vuelve a realizarse conforme a los nuevos planes generados y se observan las mejoras obtenidas.

Los agentes inteligentes de este trabajo presentan una capacidad de decisión moderada y se asume que tienen un destino en su trayecto siempre. Disponen de una estrategia de generación que descompone el plan de cada viajero en dos partes: generación de la actividad deseada y elección de la ruta a seguir. Estas estrategias son cargadas mediante un fichero XML que indica qué debe hacer el agente. Para que un agente sepa seguir una ruta, las vías de tráfico se abstraen mediante enlaces dinámicos (vías) y nodos (cruces). En cuanto a la simulación, está dividida en dos capas bien diferenciadas:

- La capa física: la cual simula el mundo físico donde los agentes se mueven e interactúan con el entorno.
- La capa mental: en la cual los agentes generan estrategias, tales como rutas, planes y acciones a ejecutar.

Otros trabajos se basan más en el comportamiento del conductor e intentan aprender los modos de conducción existentes. Por ejemplo, en [Rigolli & Brady, 2005] se obtienen conclusiones observando las colisiones y accidentes que se producen en la simulación, así como el estado físico que presentan los conductores. El sistema es un simulador kinemático, es decir basado en movimiento, y trata de monitorizar el comportamiento de los agentes. Aunque este tipo de sistemas basados en leyes físicas es muy útil para identificar las ocurrencias de un evento específico, es incapaz de proporcionar una descripción del por qué de esos eventos. Debido a esto se muestran inapropiados para valorar el comportamiento de los conductores o si una misma acción sería llevada a cabo por diferentes tipos de conductor.

También es destacable en el trabajo de [Rigolli & Brady, 2005] varios aspectos acerca de la arquitectura de los agentes utilizados. Los agentes incluyen un módulo de razonamiento basado en la percepción cualitativa del entorno. Este módulo intenta que todos los conductores traten de conseguir un estado confortable que les proporcione un compromiso entre seguridad y desplazamiento a una velocidad deseada. Por tanto, un agente satisfecho con su estado mental no cambiará su curso de acción sin alguna influencia externa.

El módulo de razonamiento opera en dos fases:

- Propuesta de acciones: durante esta fase un espacio de acciones conveniente es sugerido en reacción a una influencia externa percibida.
- Filtrado de acciones: en esta fase el espacio de acciones generado es filtrado valorando las condiciones del entorno.

También son de interés las suposiciones realizadas por los autores sobre el comportamiento humano, las cuales son:

- Los conductores son enseñados ‘bien’ o ‘mal’ de una forma estandarizada como parte del proceso requerido para obtener la licencia de conducción.

- La mayoría de los conductores creen que ellos llevan a cabo la acción ‘correcta’ dada la situación en la que se encuentran.
- Los conductores tienden a describir otros comportamientos de los conductores en términos de su propio estilo de comportamiento.

Finalmente, los autores también consideran que existen distintas fases en la experiencia de conducción:

- Destreza técnica: los conductores aprenden a controlar, posicionar y maniobrar un vehículo.
- Leer la carretera: en esta fase el conductor aprende a interpretar, anticipar e interactuar con otros conductores.
- Fase expresiva: después de haber adquirido suficiente experiencia en las dos primeras fases, los conductores usan la manera en la cuál conducen para dar expresión a su personalidad, actitud y características motivadoras.

El otro gran grupo de simulaciones macroscópicas discutido aquí es el de las simulaciones distribuidas que utilizan agentes inteligentes, también conocidas como simulaciones distribuidas con estructura de sistema multi-agente (MAS por sus siglas en inglés) [Weiss, 2000].

Un ejemplo sería el trabajo en [Cetin et al., 2003], donde se utiliza Myrinet² para interconectar múltiples máquinas que simulan un gran área de población en Suiza. En este caso, los agentes tienen en su estado mental su origen y su destino, y utilizan el algoritmo de Dijkstra para buscar la ruta más corta al destino. El sistema presenta una arquitectura con las siguientes capas:

- Capa de simulación del movimiento.
- Capa de estado mental de los agentes.

Hay que señalar que aunque el trabajo habla específicamente de agentes, estos no presentan un comportamiento inteligente sofisticado (sólo la aplicación del algoritmo de Dijkstra y algún comportamiento autónomo puntual) ni estado de ánimo. El trabajo está orientado a la obtención de información acerca de las vías de tráfico, como podría ser la posibilidad de retenciones y dónde se producen estas. El sistema puede ser extendido para tratar otras áreas de población.

Otro trabajo que utiliza una estructura MAS distribuida es [Cicortas & Somosi, 2005], que destaca por algunas decisiones de diseño. En primer lugar, sus agentes inteligentes presentan una autonomía proactiva de actuación entre entidades, es decir, toman la iniciativa en el desarrollo de las acciones. Por lo tanto difieren considerablemente de los objetos típicos de los sistemas distribuidos, ya que estos son generalmente pasivos y sólo reaccionan a eventos. En segundo lugar, el sistema presenta una división global en dos capas principales: una encargada de la definición de los tipos de agente y otra de ordenar la composición de las instancias de los agentes.

Los agentes de este trabajo son capaces de crear otros agentes. Además utilizan mensajes de comunicación entre ellos para realizar trabajos en grupo, mejorando objetivos comunes o incluso individuales. También presentan distintos roles jerárquicos: agente creador de mensaje, agente lector encargado de reenviarlo y agente receptor/borrador del mensaje. Para el desplazamiento de los agentes por el entorno se utilizan colas que simulan las vías de tráfico: los agentes irán avanzando

² <http://www.myri.com/myrinet/>

a través de éstas según haya sitio libre en ellas, y al salir de una serán encolados en otra. Con esto se consigue que los agentes vayan avanzando siempre que haya sitio en la vía, hasta que ésta se acaba y han de continuar por otra distinta. Además comentar que los roles de los agentes no sólo se utilizan para los anteriores aspectos de gestión de mensajes y vías. También se pueden crear roles para la representación de las características del entorno: agente cruce, agente generador de vehículos, agente conector de mapas y agente conector de nodos.

La principal limitación de este trabajo es la imposibilidad de simular situaciones peligrosas o de aparición de accidentes. El sistema evita colisiones sin dar posibilidad de errores por parte de los agentes en la percepción del entorno, por lo que no es muy realista y no sirve para obtener resultados aceptables sobre la influencia del comportamiento de los conductores. Además, los conductores carecen de inteligencia en la toma de decisiones.

Finalmente hacer hincapié en una característica relevante de su entorno de simulación. Éste ofrece la posibilidad de que los usuarios creen mapas del mismo. De esta manera pueden establecer las características del entorno en que desean estudiar el tráfico.

Otros trabajos adoptan una aproximación en la que los agentes están vinculados directamente a los conductores individuales, mientras que la plataforma ofrece los servicios para la gestión de agentes y mensajes. Por ejemplo [Cao et al., 2006] despliegan los agentes en ordenadores distribuidos que están conectados entre sí mediante la plataforma de agentes.

La plataforma es la base para crear una “malla” para la representación de grandes zonas de terreno y dentro de ella establecen una estructura donde los agentes se relacionan e interactúan entre ellos. Esta malla proporciona organización virtual con capacidad para resolver problemas de manera cooperativa y conocer los puntos o requisitos más críticos, siendo una estructura alternativa a la plataforma de agentes. Por ejemplo, la malla dispone de un generador de vehículos que produce y elimina agentes de acuerdo al modelo de la simulación. Señalar que esta arquitectura es compatible con el estándar industrial para modelado HLA (High Level Architecture).

En cuanto a los agentes de este trabajo, disponen de un comportamiento individual siguiendo un rol determinado: agente pasajero, agente bicicleta, agente vehículo, agente carretera, agente semáforo, agente policía y agente de control central. Estos se dividen en dos grupos de agentes: los agentes coordinadores del tráfico intercambian información y actualizan los tiempos de simulación, por ejemplo los agentes semáforo, mientras que los agentes entidad sólo interactúan en la simulación, por ejemplo los agentes vehículo. Cada agente entidad tiene un rol con unas características y parámetros propios, y obtiene los demás datos relevantes para su actuación de los coordinadores. A partir de esta información realiza acciones basadas en sus reglas de decisión renovado su estado.

Como conclusión para este trabajo indicar que la aplicación muestra una estructura estándar de sistema distribuido y simplemente añade una serie de mejoras dedicadas al tratamiento de los agentes y del entorno. Entre sus problemas fundamentales aparece la falta de extensibilidad debido a su complejidad, la necesidad de sincronización, y la capacidad de cómputo y memoria necesarios para realizar las distintas operaciones y mantener los roles de los agentes.

Finalmente hablar sobre uno de los trabajos analíticos más importantes [Sewall et al., 2010], en el cuál se utilizan una serie de ecuaciones para la simulación a gran

escala del tráfico de una ciudad. Para ello proponen una ley de conservación no escalable linealmente para la densidad de tráfico y el flujo resultante. Este modelo se puede considerar híbrido entre macroscópico y microscópico, aunque realmente se aproxima mucho a las simulaciones del primer tipo ya que sus elementos están centralizados. Al utilizar las ecuaciones de mesoescala o escala intermedia de tipo Boltzmann se la denomina mesoscópica.

Resaltar una fuerte parametrización de las propiedades de las carreteras en este trabajo, motivada por la necesidad de realizar varias consultas durante la simulación y tener reflejada en cada momento la posición de cada vehículo. Se utiliza un modelo del entorno en forma de malla donde cada casilla cuenta con los parámetros apropiados para la simulación.

Como limitación de este trabajo indicar la falta de una representación explícita de la toma de decisiones por parte de los vehículos. Aunque el modelado del entorno está a la altura de lo buscado en plataformas de simulación, su objetivo es diferente al perseguido en esta investigación.

2.2.2. Simulaciones microscópicas

Las simulaciones microscópicas suelen ser sistemas que disponen de una serie de elementos descentralizados y con un grado de independencia muy elevado. Se centran en los componentes individuales de la simulación y en la capacidad de estos para evaluar situaciones y tomar decisiones conforme a los datos que reciben de manera específica. Estos componentes son por regla general agentes inteligentes que disponen de un estado mental complejo y están integrados en un sistema con estructura MAS [Weiss, 2000]. Debido a esto, el gasto de memoria producido por un solo agente es muy elevado, por lo que no suelen aparecer un gran número de vehículos en las simulaciones de tráfico de este tipo. Hay una gran cantidad de estas simulaciones y en esta sección se repasan algunas de las aproximaciones más importantes.

Este tipo de simulaciones ha sido empleado para analizar el tráfico cuando los conductores cuentan con escasos elementos externos que limiten su comportamiento. En estos casos, los conductores sólo deben aplicar algunas reglas generales de circulación y sus propios conocimientos o actitudes.

Un ejemplo de estos trabajos es [Parachuri et al., 2002], donde se muestran experimentos en los que se eliminan todas las señales de tráfico de un cruce o intersección. Entonces se permite que los agentes interactúen entre ellos de manera libre, cediendo el paso los unos a los otros cuando lo consideran necesario según su estado mental. El trabajo pretende simular el tráfico de ciudades como Nueva Delhi, en las que cada conductor realiza las actuaciones que considera más apropiadas sin guiarse por señales de ningún tipo. Tiene como objetivos principales modelar el comportamiento autónomo de los conductores y su interacción, así como procurar resultados realistas para estas condiciones de tráfico.

El trabajo de [Parachuri et al., 2002] también realiza una clasificación del comportamiento de los conductores según su grado de egoísmo que ha sido incorporada en este proyecto. Esta clasificación considera que todo conductor tiene un cierto grado de egoísmo por el cual desea cumplir su objetivo de llegar lo más rápido posible a su destino pero de forma segura. Los grados de egoísmo son tres: cauteloso, normal y agresivo. Esta diferenciación permite una caracterización básica de las actitudes de los conductores, pero no permite diferenciar a dos conductores del mismo tipo. En la vida real, los conductores de conducta similar

pueden actuar de diferente manera conforme a su estado emocional en un momento determinado. Por el contrario, con esta clasificación los conductores de la simulación de un mismo tipo actuarán sin variación alguna en su conducta.

La caracterización de la actitud de los agentes hacia la conducción se completa con un factor de ímpetu para los adelantamientos. Éste determina la seguridad del agente en sí mismo para completar un adelantamiento o volver a su posición anterior.

Los objetivos de los agentes permiten establecer ciertos parámetros de su comportamiento. Existen dos tipos en este trabajo: micro y macro objetivos. Los primeros son el destino que los agentes desean alcanzar y el camino que toman en la construcción de ese objetivo. Los segundos involucran la toma de decisiones en cada momento intentando buscar la satisfacción del macro objetivo.

Otros trabajos incorporan señalización en la simulación. En este caso se encuentran diferentes propuestas.

En [Doniec et al., 2008] se realiza una simulación sobre el tráfico en las intersecciones de manera microscópica mediante agentes inteligentes de igual manera que en [Parachuri et al., 2002]. Estudia la posibilidad de bloqueo mutuo en una intersección y los tipos de comportamiento de los conductores. Relaciona directamente dicho comportamiento con la infraestructura de la carretera, de manera que según como sea la carretera el comportamiento de los conductores podrá variar en un sentido u otro. Una de las ideas clave de este trabajo es la posibilidad de tratar la impaciencia actual de cada conductor de manera dinámica. La impaciencia está tratada como variable que crece conforme al tiempo de espera de un conductor en una intersección, mientras que disminuye cuando el conductor está circulando. La principal limitación de este trabajo es su ámbito reducido, ya que no abarca más tipos de entorno que las intersecciones. Por ejemplo, no aborda una ciudad completa o una amplia parte de ella.

En la misma vertiente que el anterior se encuentra el trabajo de [Dresner & Stone, 2008]. La aplicación presenta una rejilla de tamaño variable en donde se simula el entorno y cada vehículo aparece en una casilla determinada de la misma. Se centra en mejorar el tráfico en los cruces o intersecciones, desarrollando diferentes tipos de estos y variando la cantidad de vehículos que circulan a través de ellos. Esto implica otra vez una fuerte limitación del ámbito de aplicación. No obstante, el trabajo presenta varias ideas relevantes, incluyendo un estudio de las propiedades deseables para este tipo de simulaciones:

- Los agentes deberían comunicar sólo la información necesaria para que el sistema funcione.
- Los agentes deberían tener acceso sólo a la información que puedan ser capaces de obtener con la tecnología actual.
- Los vehículos deberían ser tratados como agentes individuales, y no mediante un control centralizado.
- El sistema debería incorporar un protocolo de comunicación simple que permita a los agentes saber sólo lo mínimo sobre cada orden.

Los experimentos del trabajo también aportan algunas conclusiones interesantes sobre el tráfico. Por ejemplo, muestran que las intersecciones con poco movimiento de tráfico suelen ser controlables mejor sin semáforos, meramente confiando en el comportamiento de los conductores. En general, se observa que en muchas de estas

intersecciones los semáforos sólo disminuyen la velocidad del flujo de tráfico, al tener a una serie de conductores parados mientras que por las otras ramas de la intersección no circulan conductores. Esta premisa es tenida en cuenta en el trabajo de este proyecto, ya que los mapas de las ciudades creadas de ejemplo no presentan semáforos en las intersecciones con poco tráfico, sino simplemente señales de stop o ceda el paso.

Otro tipo distinto de simulaciones microscópicas son aquellas que utilizan un marco de trabajo TRASS (TrAffic Simulation System) en el que los agentes representan roles de tráfico distintos, como pueden ser conductores de distintos tipos de vehículos o peatones [Lotzmann & Möhring, 2008]. Este sistema de simulación es utilizado para especificar el modelo topográfico y las características físicas de los agentes. Su núcleo también soporta las funciones de mediación en la comunicación entre agentes y control del tiempo y del espacio en la simulación. Este núcleo está separado de la interfaz. Ésta incluye facilidades para la definición de tipos de agente con comportamiento específico, la configuración con ficheros XML de la simulación, el acceso a las estructuras de datos del núcleo, y la administración de la simulación. La arquitectura de estos agentes está bastante elaborada y se organiza con la ayuda del TRASS en tres capas con objetivos diferentes: *física*, *robótica* y *de inteligencia artificial*.

La *capa física* describe la abstracción de las propiedades estáticas y los parámetros de movimiento. Define la apariencia física de los agentes en el entorno artificial y está compuesta de cinco elementos: la sombra del agente (el espacio que ocupa), la unidad sensor, el área de comunicación, el punto de referencia en dos dimensiones y los atributos velocidad y dirección.

La *capa robótica* controla los cambios de parámetros dependiendo del estado activo y los incidentes percibidos en el entorno. Está inspirada en el modelo de clasificación de las necesidades humanas de Max-Neef [Max-Neef et al., 1991]

- De supervivencia: controladas por el cerebro y el cerebelo obteniendo decisiones automatizadas.
- Sociales: controladas por el sistema límbico, utiliza heurísticas colectivas.
- De identidad: controladas por el neo córtex y utiliza heurísticas individuales.

La *capa de inteligencia artificial* se utiliza para dotar a los agentes de un comportamiento realista en la conducción. Tiene las siguientes funciones: percibir el entorno, componer y memorizar una vista individual del entorno, comunicarse con otros agentes, razonar sobre alternativas, ejecutar acciones físicas y estimar el éxito de una acción.

El entorno de simulación consiste en una calle de un único carril que corre de norte a sur, junto con peatones que se desplazan aleatoriamente a través de la vía o en paralelo a ella. Hay un supervisor que penaliza los errores cometidos tanto por los agentes conductor como por los agentes peatones. Finalmente indicar que el sistema resulta limitado en cuanto al entorno simulado. El uso de una sola calle para observar el comportamiento y la interacción de los conductores no permite la aparición de situaciones que son fundamentales en el tráfico actual.

Otro grupo de trabajos son los sistemas capaces de auto-organizarse, como el presentado en [Sansores & Pavón, 2008]. Este tipo de sistemas está orientado a modelar estructuras sociales auto-organizables cuyos individuos exhiben una adaptación remarcable a los cambios en el entorno y están dotados de mecanismos

para evaluar opciones y tomar decisiones. La auto-organización propuesta en el modelo de [Sansores & Pavon, 2008] está fundamentada en la habilidad de los agentes para cambiar dinámicamente su comportamiento de acuerdo al aprendizaje por refuerzo. Las consecuencias de este aprendizaje son que los agentes adaptan sus capacidades a través de roles especializados y su comportamiento puede ser modificado aunque persigan un único objetivo. Un agente tiene un procesador del estado mental que permite al agente decidir qué tarea realizar, y un manejador del estado mental para crear, modificar y eliminar entidades del mismo. Como conclusión a este trabajo, decir que está orientado hacia el modelado de pequeñas sociedades y comparte varias ideas con la estructura y comportamiento idealmente deseados de las simulaciones de agentes.

También se debe hacer mención a otro grupo de sistemas basado en el paradigma de la orientación a objetos. Frente a los sistemas orientados a agentes, estos tienen la ventaja de utilizar una infraestructura basada en objetos en la que los desarrolladores tienen más experiencia y las herramientas son más similares a desarrollos estándar de software.

Dentro de estos sistemas encontramos el trabajo en [Fuks, 2008]. En esta aplicación las vías de tráfico están representadas por objetos que tienen una serie de atributos como número de calles, número de carreteras, distancia o dirección del tráfico. Esta estructura es mejorable, pero muestra un camino a seguir que presenta amplias posibilidades para el modelado de las estructuras del entorno. Se divide en tres niveles jerárquicos:

- Nivel 0: contiene una red topológica que contiene líneas de tráfico descritas por nodos y aristas.
- Nivel 1: contiene características simples de elementos de carretera y cruces.
- Nivel 2: las características simples son agregadas a una característica de mayor nivel.

El significado de estos niveles es importante para la toma de decisiones de los agentes, ya que los agentes utilizan los distintos niveles para tareas diferentes. El nivel 0 es utilizado para la planificación de rutas, el nivel 1 en el procesamiento de las decisiones de conducción, y el nivel 2 para la planificación de rutas a un nivel de abstracción elevado. Además, los agentes presentan un conjunto de habilidades como acelerar, decelerar, adelantar o leer símbolos del tráfico. Se realiza una distinción en los tipos de los agentes³ clasificándolos como:

- Agente mundial: encapsula la infraestructura de las carreteras y sincroniza la simulación.
- Agente móvil: simula los conductores en la infraestructura.
- Agente visualizador: visualiza la simulación en algún tipo de aplicación gráfica.

Para concluir los comentarios sobre este modelo decir que es un trabajo típico de simulación a nivel microscópico. Sigue una serie de directrices comunes para la gran mayoría de las simulaciones de este tipo como pueden ser agentes inteligentes con estado mental complejo, fuerte descentralización y toma de decisiones avanzada. Hay que destacar la relevancia en su diseño del modelado orientado a

³ Este trabajo es un ejemplo de uso del término agente en el sentido de representación de los conductores y no en el del paradigma de agentes software, como se señaló en la introducción de la sección 2.2.

objetos para trabajar con aquellos elementos del entorno que no son considerados agentes.

Otro tipo de propuestas son aquellas que utilizan un modelo híbrido en vez de un modelo centralizado o descentralizado. Una de estas aproximaciones es la de [Jin et al., 2007], la cual se centra en problemas de interés general como pueden ser la disminución de la congestión de tráfico y la contaminación aérea. Este modelo permite a los agentes acceder a la información solicitándola a través de un solo tipo de agente. Por el contrario, en los modelos centralizados esta información sólo está disponible para un tipo de agente y no puede ser solicitada por otros, mientras que en los modelos descentralizados cualquier tipo de agente es capaz de acceder a ella. Sobre los agentes que se utilizan, es de importancia remarcar la simulación de varios tipos de comportamientos complejos como pueden ser: autonomía, aprendizaje, descomposición de tareas en tareas más pequeñas, y comunicación o cooperación entre agentes. También realiza una clasificación de los agentes:

- Agente de usuario: representa un usuario humano y sus interacciones con el sistema. Es responsable de capturar los requisitos del cliente. Proporciona comunicación e interoperabilidad entre el usuario final y el sistema de información inteligente del tráfico urbano.
- Agente planificador: se encarga de procesar, asignar y encolar las respuestas de la ruta.
- Agente de ruta: se encarga de los modelos de los vehículos en el sistema. Maneja la planificación de la ruta del vehículo y proporciona interoperabilidad entre el vehículo y el sistema.
- Agente broker: es el único encargado de enlazar las respuestas del transporte con los vehículos disponibles. Maneja las descripciones de servicio provenientes de los clientes y de los vehículos.

Indicar que este trabajo está simplemente enfocado al tráfico urbano, sin hacer referencia a los demás tipos de vía. La clasificación que realiza de los agentes considera agentes de usuario y elementos del entorno, y está enfocada sobre todo a la gestión de la simulación más que a la identificación de distintos tipos de comportamientos, como ocurre en otros trabajos. No obstante, este trabajo identifica varios comportamientos complejos que los agentes pueden llegar a realizar y que pueden ser de interés en trabajos futuros.

Para finalizar, hacer referencia a una serie de trabajos menos próximos al objetivo de este proyecto que están centrados en optimizar los flujos de tráfico. En estos trabajos se persigue definir reglas de comportamiento de los conductores globales (forzadas por el sistema para todos los conductores) o individuales (adoptadas por el conductor) que optimicen algunos parámetros del tráfico. A continuación se revisan varios trabajos relevantes en esta corriente.

En [Tumer et al., 2008] se utilizan algoritmos de coordinación multi-agente proporcionando ideas para aliviar las congestiones del tráfico. Presenta dos ideas diferenciadas:

- Proporcionar incentivos a los conductores y dirigirlos hacia buenos valores de los objetivos del manejador de la ciudad.
- Mostrar cómo los conductores se centran en optimizar sus propios objetivos.

En [Vasirani & Ossowski, 2009] se concibe el sistema como una economía computacional. Los agentes conductores negocian con los agentes de infraestructura en un mercado virtual, comprando reservas para cruzar las intersecciones cuando conmutan a través de la ciudad. Un control central proporciona a los agentes una estimación del coste de elección de una cierta ruta.

El trabajo en [Balan & Luke, 2006] describe un sistema para simular el comportamiento de los conductores en los semáforos. Utilizan una serie de créditos que los conductores reciben mientras esperan en un semáforo con la luz roja y canjean cuando pasan a través de las intersecciones. Los semáforos toman autónomamente decisiones acerca de sus luces conforme a la cantidad de créditos de los coches en la intersección. El objetivo es simular el fenómeno conocido como ola verde, el cual consiste en coordinar los semáforos de tal manera que los coches viajando a cierta velocidad a través de las intersecciones no tengan que parar. Esta ola verde solo puede ser utilizada en las arterias principales de las ciudades, ya que no es posible llevarla a cabo en todas las vías.

2.3. Conclusiones generales

La revisión de los trabajos anteriores en simulación ha mostrado una serie de carencias generales, referidas esencialmente a aspectos de representación e influencia del comportamiento de los conductores y al modelado de la simulación. Se trata de las siguientes:

- **Falta de flexibilidad:** casi todos los sistemas desarrollados ofrecen entornos estándar para la simulación, de forma que impiden considerar entornos con una tipología significativamente diferente e incluso cambiar ciertos aspectos de los ya proporcionados. En aquellos casos en los que sí se permite crear nuevos entornos, frecuentemente se requiere lanzar de nuevo la aplicación. Aparece la necesidad de una herramienta para crear, desarrollar y simular nuevos entornos de forma sencilla por el usuario.
- **Contexto muy específico:** va ligado con el problema anterior y se produce debido a que la mayor parte de los trabajos realizados se centran en un tipo de vía concreto, desarrollando todo su trabajo sobre ese tipo de entorno. Si se realiza una simulación del tráfico en ciudad no suele aparecer la posibilidad de que los vehículos abandonen la misma y puedan desplazarse por otros tipos de vía. En otros casos, las simulaciones representan partes conflictivas de las vías interiores de las ciudades como pueden ser intersecciones o cruces. Ello permite identificar posibles fallos en el diseño de la intersección en la vida real o estudiar cómo afecta el comportamiento de los conductores en un entorno de ese tipo. Por el contrario otras simulaciones representan partes conflictivas de vías exteriores o interiores para obtener resultados sobre retenciones y posibilidad de accidentes con un volumen de tráfico determinado por el usuario. Por todo esto se hace patente la necesidad de una herramienta capaz de poder realizar simulaciones con cualquier tipo de entorno deseado por el usuario.
- **Mínima relevancia del comportamiento de los conductores:** no aparece un fuerte interés por identificar, clasificar y obtener resultados específicos acerca del comportamiento en las investigaciones tratadas. Los pocos trabajos que se interesan por el comportamiento de los conductores y su influencia en el tráfico lo suelen hacer considerando características aisladas y de una manera poco profunda, ya que realizan clasificaciones muy

básicas. Surge la necesidad de realizar una clasificación de los comportamientos y posibles estados de ánimo de los conductores, estudiando cómo afectan estos al tráfico. Como muestran los estudios del tráfico real, el comportamiento de cada conductor influye en el del resto y en el tráfico en general.

- Baja complejidad del comportamiento de los conductores y toma de decisiones poco realista: asociado con el anterior, este punto indica la poca capacidad de toma de decisiones que presentan los agentes que realizan la función de un conductor. Los agentes de los trabajos actuales no modelan la realización de las tareas de conducción de forma realista. Estos agentes simplemente intentan cumplir un objetivo sin considerar el proceso que realizaría un conductor real para abordarlo. Ello impide considerar de forma flexible la variabilidad en la ejecución de las tareas resultante de diferentes condiciones externas y del conductor. Surge la necesidad de seguir un proceso de comprobaciones tal y como lo realizaría un conductor real, a la vez que una realización de movimientos realistas para poder obtener unos datos en la simulación lo más ajustados posible a la vida real.
- No hay diferenciación entre vehículos: en los trabajos actuales casi ninguno presenta una variación de las características del vehículo, es decir, todos los automóviles tienen las mismas cualidades técnicas. Hacer más realista la simulación y observar la influencia del tipo de vehículo sobre el tráfico requiere incluir una serie de atributos diferenciadores de los diferentes tipos de vehículos y sus efectos en la conducción. Por ejemplo, el conductor de un automóvil medio (entre 70-90 cv) no dispondrá de capacidad para desplazarse a la misma velocidad o realizar una maniobra de adelantamiento con la misma facilidad que el conductor de un automóvil con una cilindrada mayor.

El presente proyecto persigue abordar estas limitaciones mediante un nuevo entorno de simulación que considere las características del comportamiento de los conductores y la influencia que los tipos de vías y vehículos tienen en la conducción. La siguiente sección presenta los requisitos para dicho sistema y el mismo.

3. Prototipo desarrollado

3.1. Presentación del prototipo

3.1.1. Requisitos del sistema

Este apartado muestra como el sistema diseñado y desarrollado aborda los aspectos problemáticos anteriormente comentados. Las soluciones propuestas no son definitivas, pero sí abren potenciales líneas de trabajo para conseguir entornos de simulación más flexibles, con un comportamiento más realista y que reflejan múltiples factores de forma integrada.

Las mejoras realizadas a los problemas generales encontrados son las siguientes:

- **Alta flexibilidad y contexto variable:** la aplicación permite especificar distintos tipos de entorno. En la actualidad se contemplan tres tipos de vías: autovía, carretera secundaria y ciudad. Estos agrupan características comunes en diferentes entornos de circulación. También se permite la creación de entornos mixtos, es decir ciudad – autovía, ciudad – secundaria, secundaria – autovía. Los diferentes tipos de entornos admiten una variedad de elementos para ajustar sus distintas características. La combinación de tipos de vías y elementos del entorno permite crear una gran variedad de escenarios, por ejemplo una intersección en ciudad, una autovía de múltiples carriles o una ciudad con multitud de avenidas y calles. Un entorno puede ser modificado sin más que editar su fichero de configuración.
- **Relevancia del comportamiento de los conductores:** todos los conductores en el sistema actúan según la caracterización de su comportamiento. Su estado mental dispone de una serie de atributos de comportamiento y cada agente realiza actos conforme a esas pautas. Hay dos clasificaciones desarrolladas en el estado mental, una basada en la clasificación de los conductores en agresivos, normales y moderados, y otra basada en el estado de ánimo. Esto permite que haya conductores del mismo tipo que realicen maniobras de forma distinta o incluso nuevas maniobras que otros conductores no consideren apropiadas. Gracias a estos comportamientos que simulan de forma más realista a un conductor en la vida real se pueden obtener resultados acerca de cómo influyen ciertos tipos de conductores en el tráfico actual.
- **Comportamiento complejo y toma de decisiones realista:** ligado en parte al punto anterior, se ha incrementado la complejidad del comportamiento, aunque ésta es susceptible de mejora. Por el momento se ha considerado suficiente para la etapa actual de la investigación, ya que se han encontrado resultados que muestran la influencia del comportamiento de los agentes en el tráfico de la simulación. Es una vía a desarrollar y ampliar en trabajos futuros. También se ha perseguido dotar a la toma de decisiones de un cierto realismo. Para ello se ha hecho que cada conductor evalúe las opciones disponibles en el entorno, desechando aquellas que no cumplan unas determinadas condiciones y ajustándose a su objetivo más inmediato siguiendo unas pautas determinadas. Se considera que este proceso es próximo al que adopta una persona al volante en la vida real.

- Diferenciación básica entre vehículos: se puede elegir entre realizar una simulación con vehículos lentos y con vehículos rápidos para observar los distintos resultados producidos. Es una diferenciación básica porque solo se han tenido en cuenta para esta investigación algunos atributos esenciales que diferencian un vehículo de otro: la velocidad máxima y la aceleración. En trabajos futuros puede ser interesante realizar mejoras en este aspecto y tener en cuenta otros atributos como pueden ser las dimensiones del vehículo, la calidad del frenado o su maniobrabilidad.

3.1.2. Presentación y funcionamiento del prototipo

Comenzar indicando que el sistema desarrollado es un MAS sin plataforma de agentes [Fernandes & Nunes, 2008]. Desde el punto de vista de su estructuración, utiliza los patrones Modelo-Vista-Controlador (MVC) y observador para desacoplar interfaz y lógica y gestionar eventos. La aplicación está dividida en dos capas:

- *Capa de simulación y manejo de datos.* Obtiene los datos que son introducidos por el usuario, realiza las operaciones correspondientes con estos datos, crea los elementos de la simulación como pueden ser los propios agentes y muestra el desarrollo de la misma gráficamente.
- *Capa de agentes.* Lleva a cabo la toma de decisiones de los agentes y la propagación de información entre el entorno y los vehículos y los propios agentes conductores.

La aplicación ha sido desarrollada siguiendo la metodología INGENIAS [Pavón et al., 2005; Botia et al., 2008] y usando JAVA como lenguaje de programación. INGENIAS proporciona un lenguaje de modelado y un proceso software para la especificación de los agentes, su entorno, y el código asociado [Soto et al., 2006]. Además dispone de la herramienta IDK (*INGENIAS Development Kit*)⁴, la cual soporta tanto el modelado como la generación de código de manera automática además de la creación de documentación HTML.

Se ha perseguido dotar a la aplicación de una interfaz gráfica intuitiva a fin de facilitar su uso por usuarios con distinta formación. La interfaz permite utilizar tanto menús como botones, ya que tienen un comportamiento equivalente. También aparece una barra de deslizamiento para incrementar la velocidad de la simulación. A la derecha de la ventana principal se incluye una leyenda que facilita la interpretación de los objetos representados en las simulaciones.

El funcionamiento del entorno es como sigue. Se comienza en la interfaz de carga de entornos de simulación (ver figura 1). En ella se elige la opción ‘cargar’, tras lo que aparece una ventana para seleccionar cualquiera de los ejemplos predefinidos. Las carpetas que muestra dicha ventana son: ciudad, autovía y secundaria. Dentro de ellas hay archivos XML que generan entornos del tipo que indica el nombre de cada carpeta. Si se desea crear un entorno nuevo sólo hay que crear un archivo XML apropiado y proceder a cargarlo.

Los ficheros XML que definen entornos válidos cuentan con los siguientes elementos: vegetación, edificios, terrero sin urbanizar, autovías, secundarias, calles principales, calles secundarias y callejones con sus distintos tramos de unión,

⁴ <http://grasia.fdi.ucm.es/main/?q=en/node/127>

entradas y salidas, semáforos, señales de stop y de ceda el paso. Estos archivos son validados por la herramienta en el momento de la carga, es decir, se comprueba que estén bien formados. Para esto deben incluir al menos una vía de tráfico con una entrada y una salida, ya que los vehículos entrarán en la simulación por las entradas y la abandonarán por las salidas. La excepción a esta regla son los entornos urbanos, donde el requisito de las salidas no se aplica. También se debe cuidar que las vías representadas guarden una distancia con los márgenes de la ventana para que no se produzcan errores inesperados. Como se ha comentado anteriormente, el usuario cuenta con varios ejemplos de especificaciones ya definidas que puede examinar para obtener más información.

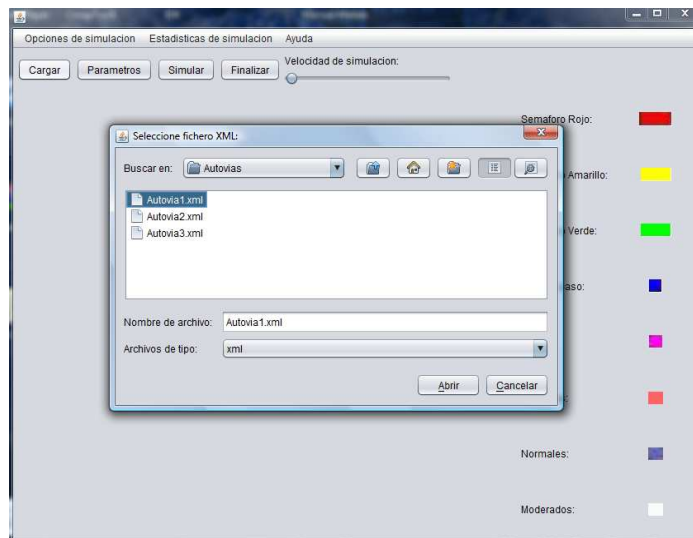


Figura 1: Carga del entorno deseado.

Una vez cargado el entorno que se desea, se procede a introducir el número de vehículos que han de aparecer en la simulación y el tipo de conductores de los mismos (ver figura 2).

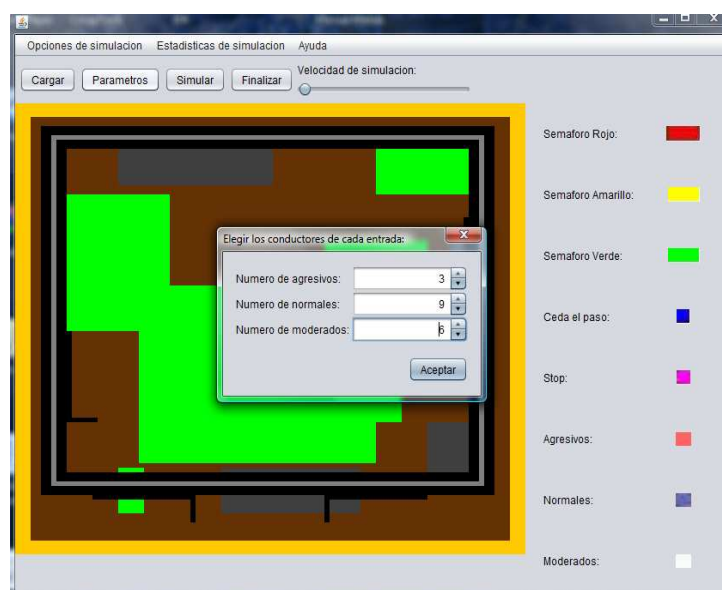


Figura 2: Selección del número de vehículos.

Más adelante se selecciona el estado de ánimo de los conductores de esos vehículos, pudiendo elegirse entre impacientes, medios, pacientes o población aleatoria (ver figura 3).

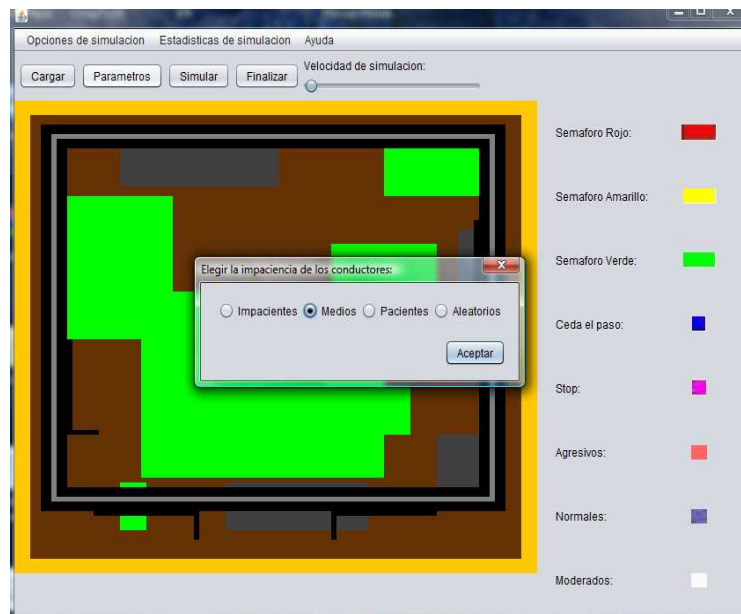


Figura 3: Selección del estado de ánimo de los conductores.

Después hay que elegir el tipo de vehículo que se desea que los conductores conduzcan entre rápidos o lentos (ver figura 4).

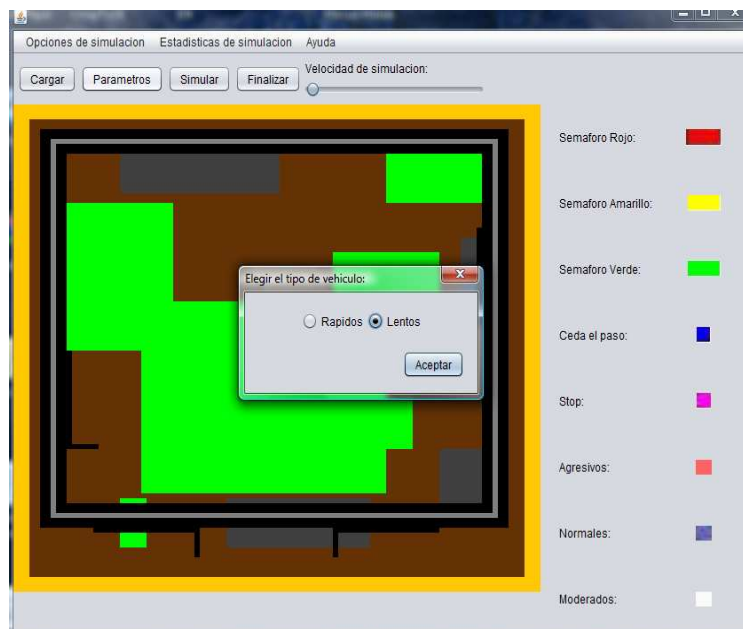


Figura 4: Selección del tipo de vehículo.

Como último parámetro hay que seleccionar el tipo de simulación que se desea: larga, media o corta. El tipo de simulación permite realizar estudios con diferentes distancias y tiempos (ver figura 5). Las distancias son 50, 25 ò 10 vueltas

respectivamente en circuitos no urbanos y 25, 12, 5 instrucciones a seguir en circuitos urbanos.

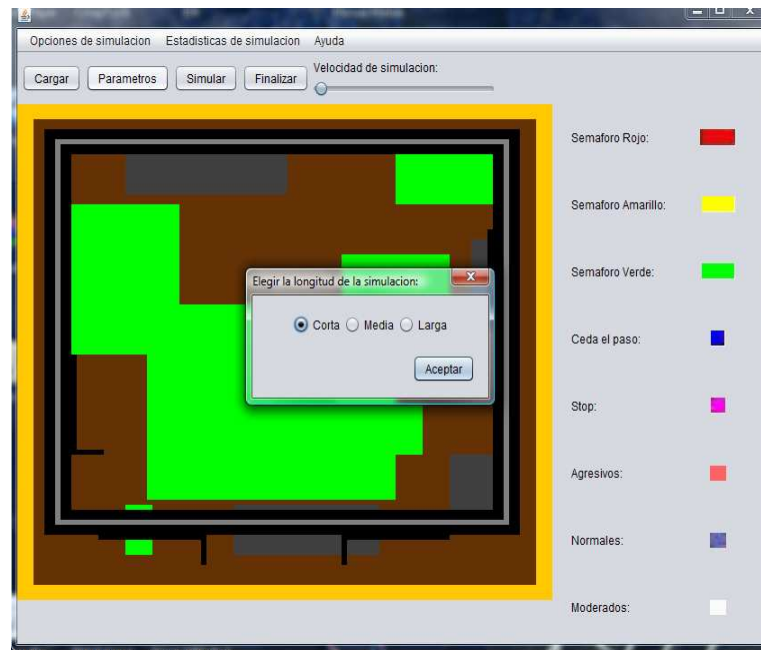


Figura 5: Selección del tipo de simulación.

Finalmente hay que pulsar el botón 'simular', o elegir la opción con el mismo nombre que aparece en el menú, y comenzará la simulación. La simulación terminará cuando se alcance la distancia deseada o se seleccione el botón o la opción de menú 'finalizar'. Durante la ejecución de la simulación o al final de la misma se pueden observar las estadísticas y así realizar un estudio más detallado. Si se desea volver a realizar otra simulación simplemente hay que volver a repetir el proceso, sin tener que volver a lanzar la aplicación.

Una información más detallada del funcionamiento del sistema se puede obtener en la ayuda en línea de la propia aplicación. Para consultarla hay que elegir en la aplicación la opción del menú 'ayuda' y luego 'consultar manual', consiguiendo así que se muestre una nueva ventana con el texto de apoyo.

3.2. Diseño y modelado del prototipo.

Una vez explicado el funcionamiento básico de la aplicación se procede a explicar como está desarrollada y cómo los agentes realizan las diversas operaciones. Para comenzar (ver Figura 6) se explica la estructura de la aplicación mediante un diagrama de clases simplificado y sin atributos en las clases, en el que aparecen las relaciones entre los distintos objetos.

El sistema tiene una estructura basada en el patrón MVC. El entorno hace las veces de modelo y genera todos los objetos necesarios para el funcionamiento del mismo. Estos son: el generador de tráfico, el cuál es un hilo independiente que se dedica a producir los conductores solicitados junto a su vehículo; el gestor de semáforos, otro hilo que es únicamente utilizado en las simulaciones con ciudades para simular el efecto de la ola verde [Balan & Luke, 2006]; un gestor XML que carga los ficheros de entorno y de configuración; y los tres tipos de entornos básicos, los cuales están asociados al modelo general. Los conductores disponen de un estado mental sobre el que evalúan decisiones y un comportamiento explícito de

toma de decisiones de acuerdo a la decisión evaluada. La vista dispone de un panel en donde se muestra gráficamente la simulación y ésta se comunica con el entorno solamente mediante el controlador, haciéndola independiente del sistema y permitiendo una alta flexibilidad a posibles modificaciones o sustituciones de la misma en el futuro. Hacer énfasis también en que la vista se modifica conforme al modelo por medio de un patrón observador para que esta permanezca actualizada en todo momento.

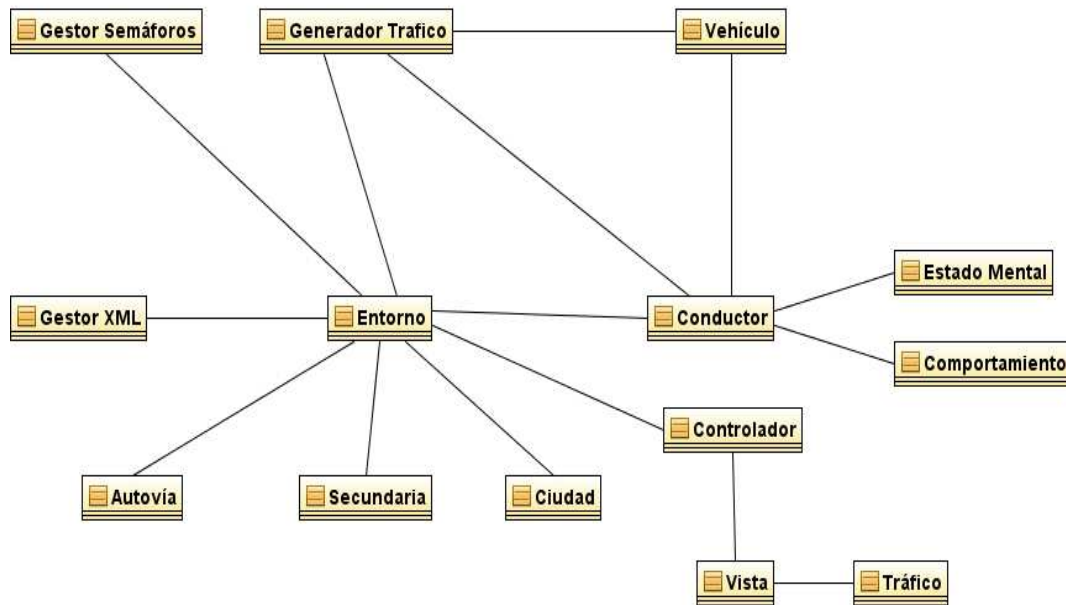


Figura 6: Diagrama de clases simplificado.

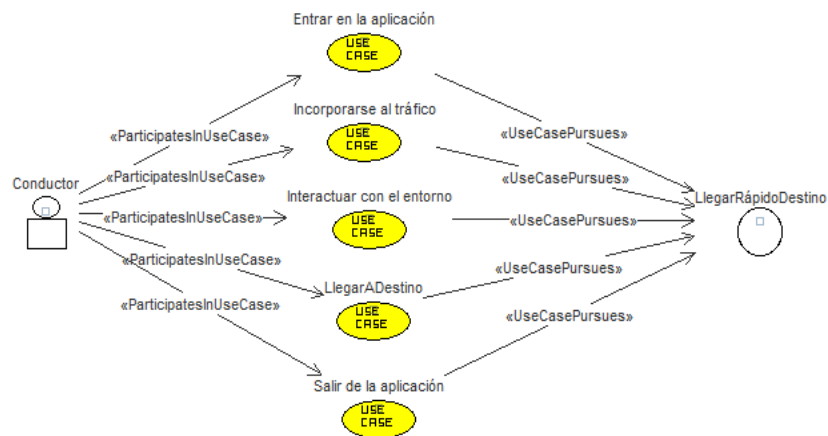


Figura 7: Casos de uso de los conductores.

Ya comentada la estructura general del sistema, se procede a explicar los casos de uso que presentan los agentes conductores (ver figura 7). Todos los casos de uso están enfocados a cumplir el objetivo principal de los agentes: llegar rápido al destino. Los agentes conductores utilizan el entorno para la toma de decisiones y las hacen saber a su vehículo para que éste las ejecute convenientemente. La primera acción que realiza un agente en la simulación es entrar al entorno por uno de los carriles de aceleración, para después recorrer el mismo e incorporarse a la vía de tráfico. Una vez dentro de la vía de tráfico principal se dedica a continuar su interacción con el entorno y con el resto de conductores intentando satisfacer sus objetivos más inmediatos sin olvidar el objetivo final. Finalmente consigue llegar a su destino y sale del entorno. Esta salida puede ocurrir de dos maneras distintas según el entorno en el que se encuentre: bien el agente llega a su destino en la

ciudad y sale de la simulación, o bien toma la salida para abandonar la vía principal y sale de la simulación cuando llega al final del carril de deceleración.

Tras considerar los casos de uso es el momento de hacer referencia al entorno de los agentes (ver figura 8). Este entorno está formado básicamente por el medio en el que el agente conductor se mueve y por el vehículo automóvil del que dispone. El agente conductor es el que realiza la función de enlace entre ambos entornos y permite su interacción, siendo el gestor de la información que comparten entre ellos.

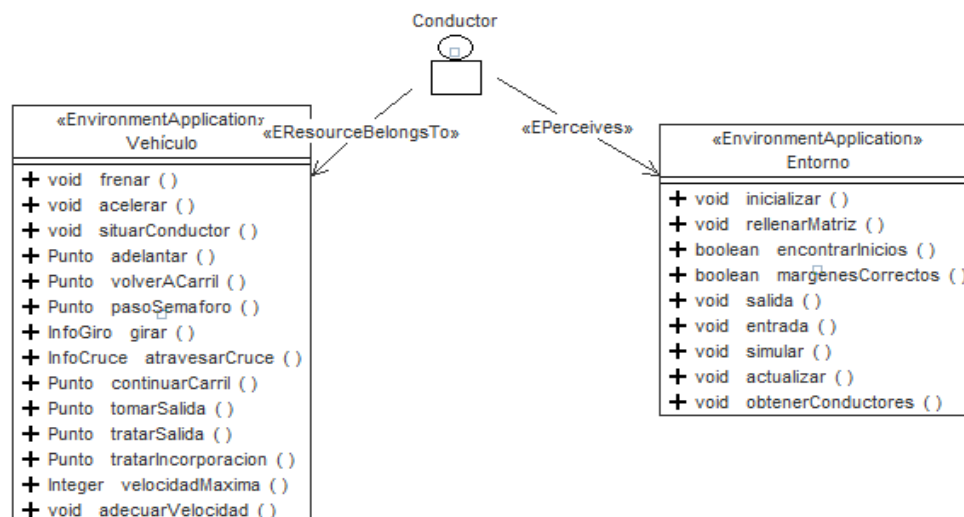


Figura 8: Entornos del agente conductor.

Entrando más en detalle en el modelado, se debe proceder a explicar la estructura básica de los agentes conductores. Esta estructura se orienta a permitirles satisfacer su objetivo prioritario de llegar lo más rápidamente posible a su destino.

Siguiendo [Parachuri et al., 2002], este sistema considera tres tipos de agentes diferenciados (agresivos, normales y moderados) y un estado mental. Estos tipos de agente influyen en el comportamiento de los conductores ya que cada tipo presenta: su propia forma de enfocar las maniobras que deben realizar en el transcurso de la simulación, un respeto por las normas de tráfico determinado y un “sentido común” bien diferenciado. Un conductor agresivo superará de manera habitual la velocidad máxima permitida en la vía por la que circule, mientras que un conductor normal circulará próximo a esa velocidad o por debajo, y un conductor moderado nunca llegará a alcanzar el límite permitido. En las maniobras de adelantamiento, un conductor agresivo no respetará el margen de seguridad con los demás vehículos e intentará adelantamientos que entrañen un riesgo elevado incluso para él mismo, aunque finalmente no pueda completarlos. Por contra, un conductor normal realizará estas maniobras siempre dentro de unos límites seguros y un conductor moderado abortará adelantamientos en teoría simples demostrando inseguridad. Finalmente, indicar también que dentro de ciudad un conductor agresivo puede llegar a ser un auténtico peligro para el resto de conductores si su impaciencia es elevada, ya que no respetará ningún tipo de señal. Sin embargo, un conductor normal actuará de manera correcta, mientras que un conductor moderado será propenso a producir embotellamientos y atascos debido a su lentitud en el desplazamiento y en la toma de decisiones. Estos tipos de agentes se caracterizan mediante una serie de atributos para la evaluación de las situaciones percibidas por el conductor (ver figura 9).

El comportamiento del conductor viene determinado además por otros atributos que dan información acerca de otros objetivos a alcanzar. El atributo ruta asignada puede ser de dos formas diferentes: bien indica el número de vueltas que un agente debe de realizar al circuito creado, decrementándose en una cuando pasa por el inicio del mismo, o bien presenta una serie de instrucciones para llevar a cabo cuando el entorno concuerda con la instrucción actual de la ruta. En cuanto a los atributos dirección actual y número de intentos representan datos que el agente debe tener en cuenta tanto para saber hacia donde se dirige como para realizar las gestiones oportunas al intentar adelantamiento complicados.

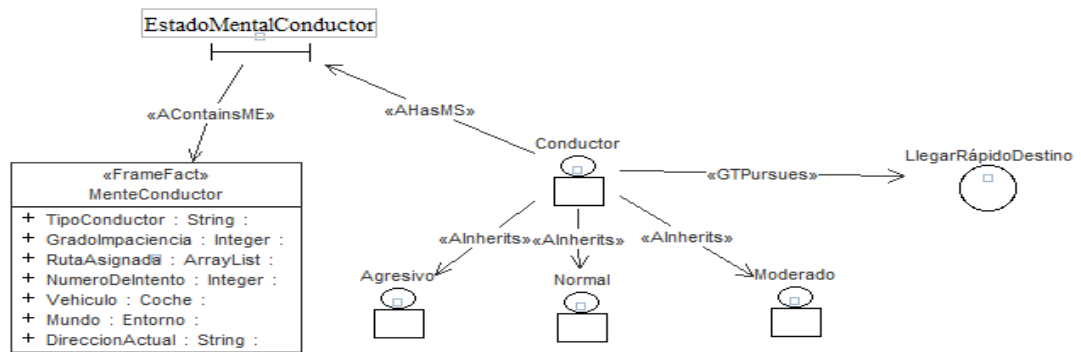


Figura 9: Estructura básica de los agentes.

El objetivo final de los agentes conductor, 'llegar rápido al destino', se descompone en una serie de subobjetivos y tareas que permiten el cumplimiento del mismo (ver figura 10). El objetivo principal tiene dos subobjetivos primarios, que son llegar al final de la ruta y realizar una actuación determinada conforme a la evaluación del entorno y al estado mental del agente. Cuando se cumplen estos dos objetivos, el agente cumple su objetivo principal y finaliza. El subobjetivo 'realizar actuación' a su vez tiene una descomposición en otros objetivos, los cuales son los posibles a satisfacer según la evaluación del entorno. Estos objetivos junto con su correspondiente tarea son: girar, volver al carril derecho más inmediato, adelantar, frenar, acelerar, continuar, buscar un obstáculo y actualizar el entorno percibido.

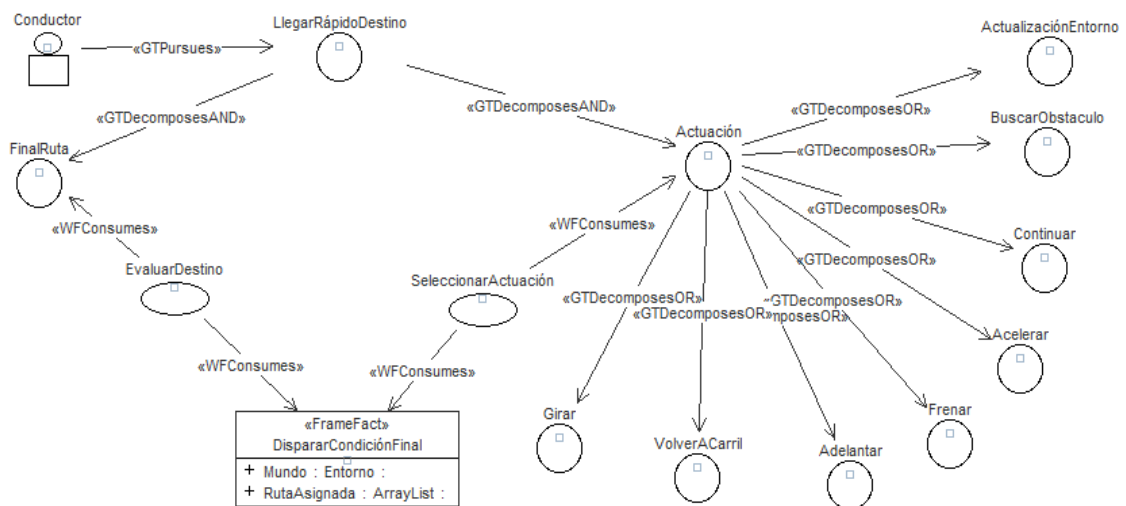


Figura 10: Tareas y objetivos básicos de los agentes.

Es fundamental para la comprensión del modelado realizar un inciso para explicar la jerarquía de las evaluaciones disparadas antes de continuar con los objetivos, tareas y sus descomposiciones. Todas las evaluaciones tienen su origen en el estado mental del agente y los atributos en él. Los agentes disparan secuencialmente las posibles evaluaciones, seleccionando entre las positivas la más conveniente para sus intereses y llevándola a cabo.

Para observar mejor los objetivos y subobjetivos de cada agente, es interesante realizar una jerarquía de objetivos (ver figura 11). Ésta permite explicar con más claridad todas las acciones en las que están implicados estos objetivos e identificar claramente tanto los macro objetivos como los objetivos a corto plazo de cada agente conductor.

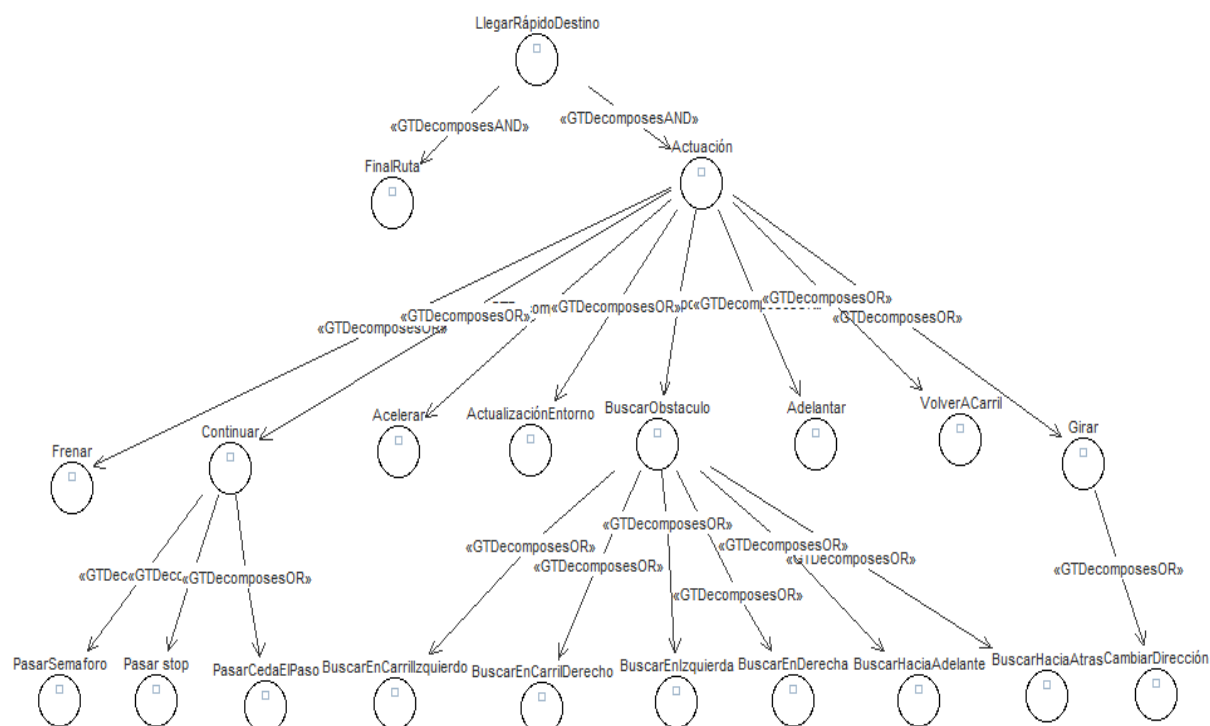


Figura 11: Jerarquía en árbol de los objetivos.

Después de haber mostrado la estructura de los agentes y la clasificación de los objetivos es momento de explicar el orden seguido en las actividades de los conductores. Mediante un diagrama de actividades (ver figura 12) se puede comprender cómo los agentes realizan las evaluaciones y toman las decisiones necesarias. Se puede observar que lo primero que hacen es comprobar si han llegado al destino, y por lo tanto cumplido su objetivo principal. En caso negativo, los agentes proceden a evaluar qué actuación de las permitidas debe realizarse. Finalmente se realiza la actuación seleccionada y se vuelve de nuevo al principio para repetir todo el proceso hasta llegar al destino.

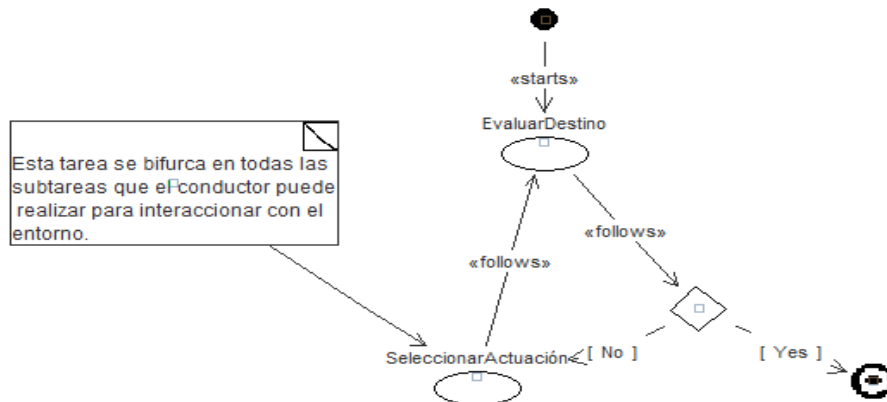


Figura 12: Diagrama de actividades.

La inicialización de la simulación (ver figura 13) es otro aspecto clave del funcionamiento del sistema. Cuando un agente es creado se le otorga un estado mental, el cual cuenta con una serie de atributos. El tipo de conductor debe ser agresivo, normal o moderado, como se explicó en anteriores ocasiones. El grado de impaciencia será 1, 2 o 3 según el estado de ánimo del conductor, siendo 1 el grado de excitación más bajo y 3 el más elevado. La ruta será asignada de manera aleatoria en caso de que el agente esté en una ciudad, o si no se le indicarán al agente las vueltas al circuito seleccionado que debe dar. También se indicará el tipo de vehículo del que dispondrá el agente. La simulación completa incluirá agentes de varios tipos interactuando entre ellos. Estos se pueden indicar en los correspondientes diagramas de despliegue (ver figura 14).

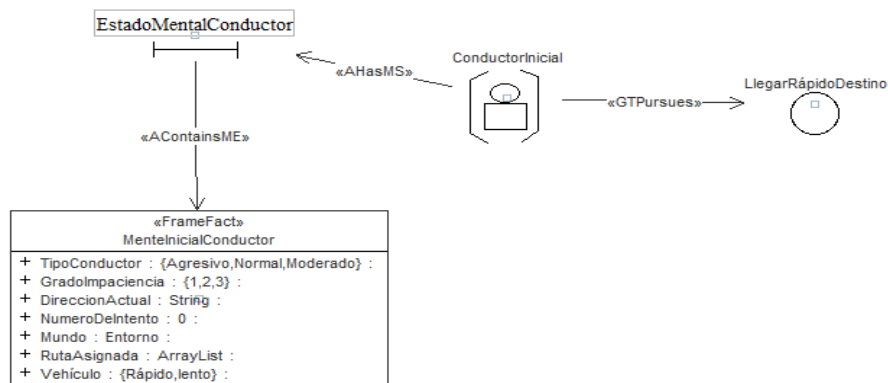


Figura 13: Inicialización de los conductores.

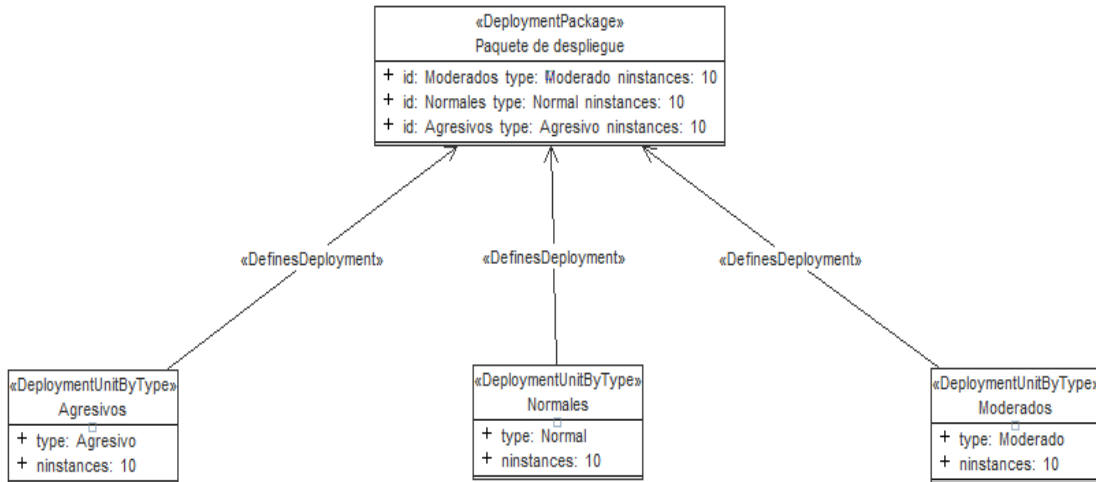


Figura 14: Ejemplo de una simulación.

Finalmente se discutirán las actuaciones que realizan los agentes, explicando en qué consiste cada una y cómo se realiza. Se comenzará por las actuaciones más generales para luego ir adentrándose en las más específicas. Las actuaciones generales son las más básicas y pueden ser utilizadas en algunos casos como complemento de otras actuaciones más complejas. También se dispone de otras actuaciones, las llamadas actuaciones útiles, que están especializadas en realizar alguna parte de una actuación específica. Finalmente las actuaciones específicas son de mayor complejidad y suelen ser compuestas.

3.2.1. Actuaciones generales

Un conductor es capaz de realizar una serie de maniobras básicas. La combinación de estas describe su comportamiento más complejo para alcanzar su macro objetivo. Las maniobras básicas son: girar, acelerar, frenar, adelantar, volver al carril, salir y actualizar su percepción. Todas menos la última implican una fase de evaluación de la posibilidad de realizar la maniobra y de ejecución de la misma en el caso de que sea posible y haya sido seleccionada para su intento.

Para *girar* el agente conductor debe comprobar según va desplazándose por el entorno si las posibilidades que éste ofrece coinciden con la instrucción actual de la ruta de su estado mental. Si se produce esta coincidencia, entonces el giro es llevado a cabo con éxito y el agente tomará como nueva instrucción actual la siguiente instrucción que haya en la ruta. En caso contrario el agente mantendrá la dirección actual del vehículo y la instrucción actual de la ruta (ver figura 15). Si la ruta no presentase instrucciones siguientes después de ser realizada con éxito una acción de giro, entonces el agente habrá llegado a su destino, cumpliendo el macro objetivo principal.

Los tipos de giro son: derecha e izquierda. Para que la instrucción actual sea considerada como posibilidad de giro deben darse dos circunstancias: el entorno posibilita realizar el giro y el tipo de vía ofrecido por el entorno es el indicado en la instrucción.

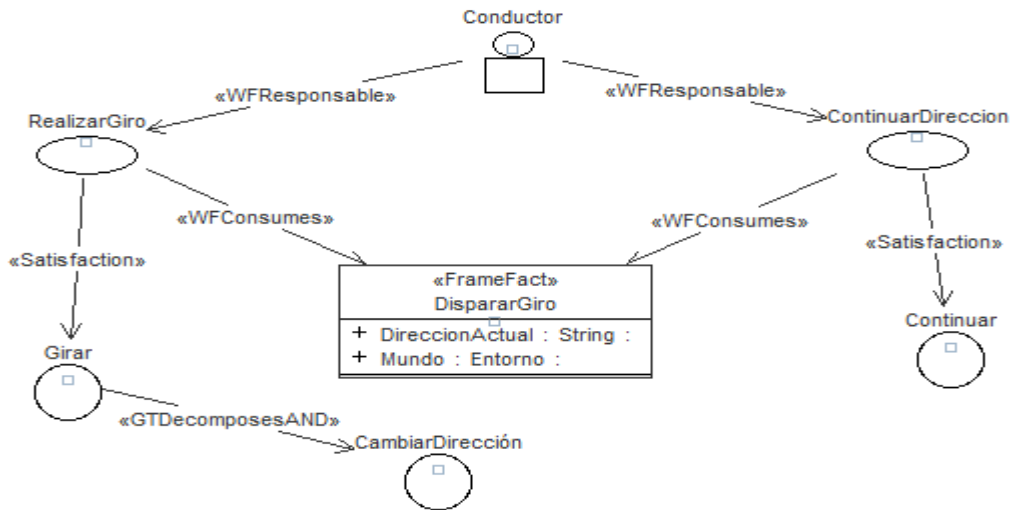


Figura 15: Evaluación de opción de giro.

Para *acelerar* el conductor evalúa el entorno y comprueba su estado mental obteniendo como resultado la necesidad de acelerar (ver figura 16). Por lo tanto incrementa su velocidad en lo que su tipo de comportamiento y tipo de conductor indiquen, pero siempre en función de la vía por la que circule. Esta necesidad de acelerar puede venir dada por diversos motivos: la ausencia de vehículos delante del propio, la urgencia por realizar un adelantamiento, o bien la necesidad de restablecer una velocidad acorde a la vía después de una reducción de la velocidad.

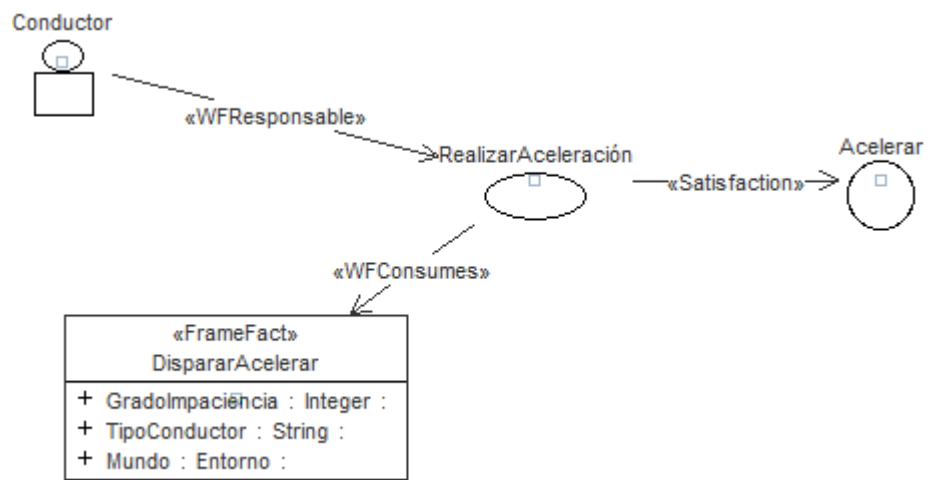


Figura 16: Realización de un aceleración.

La actuación *frenar* viene determinada por una necesidad del conductor de disminuir la velocidad actual (ver figura 17). Es debida a una información otorgada por el entorno y consensuada con su estado mental y comportamiento. En esta acción la posibilidad de detener el vehículo completamente no está contemplada, puesto que cuando un agente permanece sin movimiento alguno es simplemente porque ninguna de las opciones evaluadas es aceptable en el momento actual.

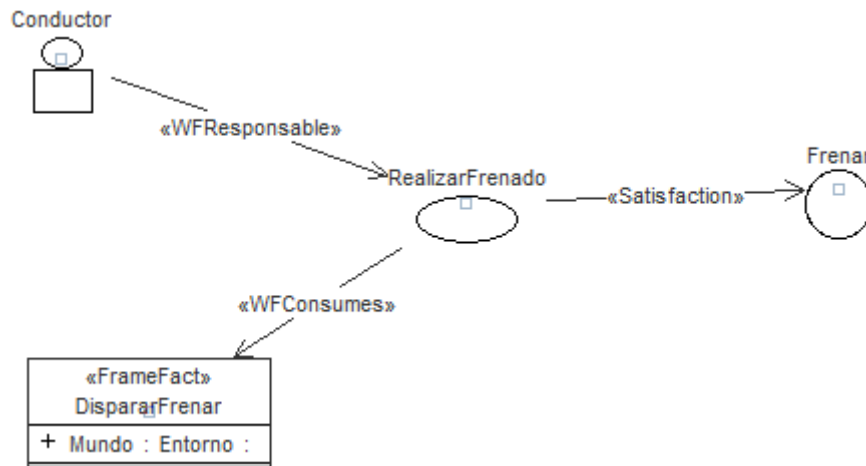


Figura 17: Reducción de la velocidad.

Para *adelantar* el conductor observa el entorno y evalúa sus posibilidades de éxito en esta maniobra (ver figura 18). Estas posibilidades son subjetivas, ya que dependen del tipo de conductor y del estado de ánimo del mismo. Si el agente conductor cree que el adelantamiento es viable tras comprobar el carril izquierdo contiguo, comienza el adelantamiento. Para ello incrementa su velocidad máxima y se cambia al carril izquierdo inmediatamente más cercano.

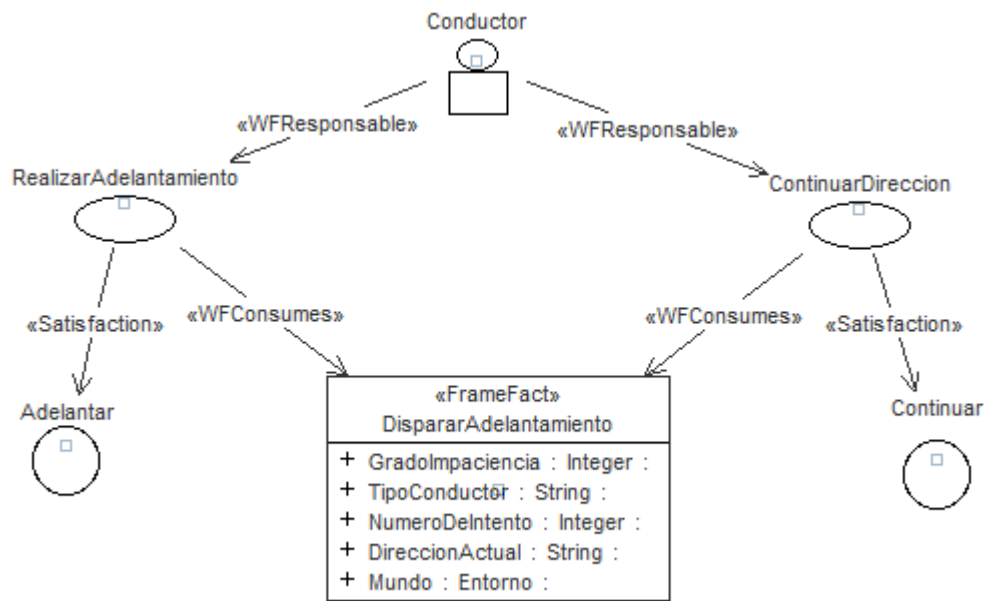


Figura 18: Realización de un adelantamiento.

La actuación *volver al carril derecho más inmediato* se realiza cuando un conductor evalúa la situación actual en la que se encuentra y decide volver en condiciones de seguridad al carril derecho (ver figura 19). Ésta se produce en una de las siguientes circunstancias:

- El adelantamiento que estaba realizando ha dejado de ser seguro bajo su entender y vuelve al carril original desde el que lo comenzó.

- El adelantamiento ha dejado de ser seguro pero considera necesario disminuir la velocidad antes ya que no puede volver al carril porque el espacio que necesita el vehículo está ocupado.
- El adelantamiento se ha completado y el conductor no tiene ninguna necesidad de permanecer en el carril actual.

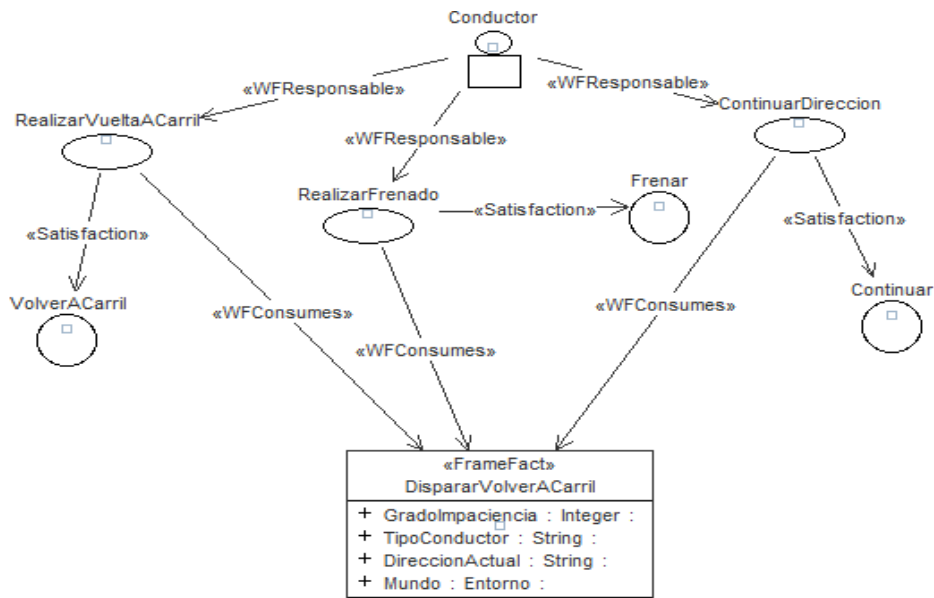


Figura 19: Vuelta al carril derecho más inmediato.

La actuación *tratar la salida de la simulación* se evalúa cuando el conductor ha abandonado la vía principal y se dirige hacia el final del carril de deceleración o ha completado las instrucciones que presentaba su ruta, dando por conseguido su objetivo principal (ver figura 20).

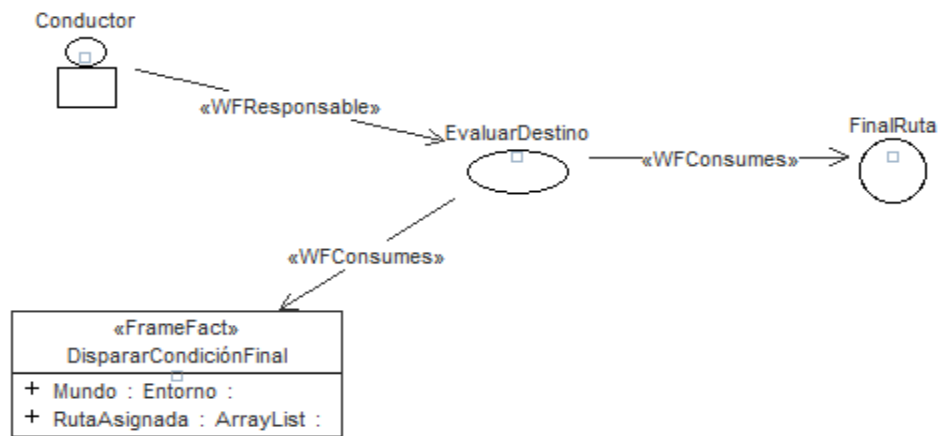


Figura 20: Cumplimiento del objetivo final del agente.

Finalmente, la actuación *actualizar la percepción del entorno* intenta simular la visión que tendría una persona en la vida real cuando está conduciendo (ver figura 21). El conductor observa el entorno constantemente con un radio de visión determinado, obteniendo toda la información posible sobre lo que hay a su alrededor. Es la única acción de todas las que presenta el agente que se evalúa

siempre sin condición alguna, además de ser la primera que se realiza en cada iteración de la simulación. El agente conductor basa sus decisiones en la porción de entorno dada por este radio de visión.

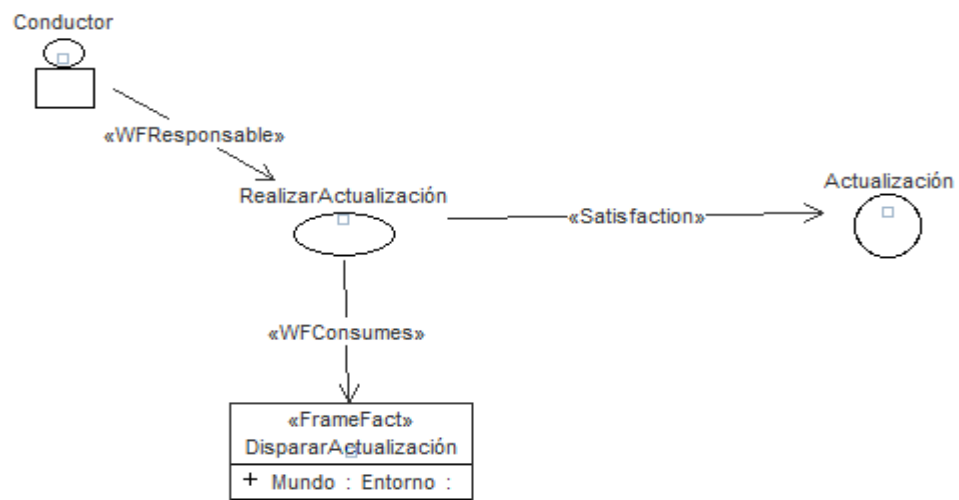


Figura 21: Actualización de la percepción del entorno.

3.2.2. Actuaciones útiles

Las acciones generales implican generalmente la realización de un conjunto de acciones para su elaboración. Estas carecen de utilidad aisladamente puesto que no producen un cambio significativo en la situación del conductor respecto al entorno. Sin embargo, son necesarias para obtener información o realizar acciones parciales que finalmente constituirán la acción general o específica. Estas actuaciones útiles son: mirar a la derecha, mirar a la izquierda, mirar en el carril derecho, mirar en el carril izquierdo, mirar adelante y mirar detrás. Nótese que en la versión actual del sistema, todas son acciones de percepción.

Al *Mirar a la derecha* el conductor desea buscar un objeto a su derecha. En esta acción utiliza su radio de visión para localizar dicho objeto (ver figura 22). Normalmente el objeto a buscar será otro automóvil que esté en las proximidades.

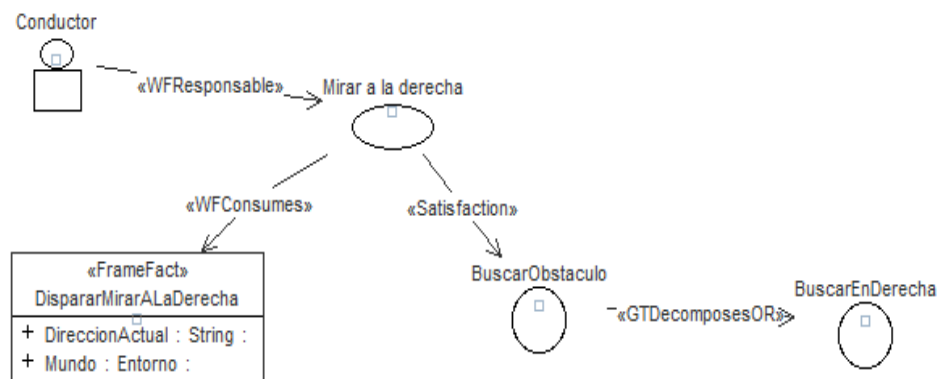


Figura 22: Búsqueda de un objeto a la derecha.

Al *mirar a la izquierda* el conductor desea buscar un objeto a su izquierda, por lo que utilizando su radio de visión procede a intentar localizarlo (ver figura 23). Normalmente el objeto a buscar será otro automóvil que este en las proximidades.

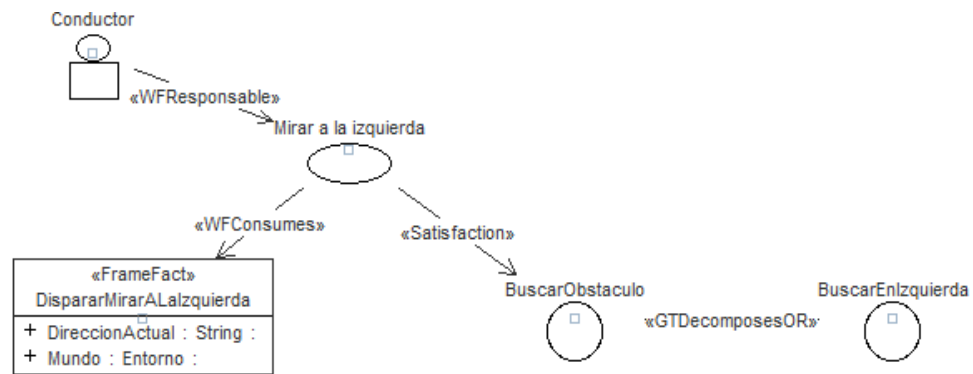


Figura 23: Búsqueda de un objeto a la izquierda.

Cuando el conductor realiza la actuación *mirar en el carril derecho* desea buscar un objeto en el carril derecho más inmediato, por lo que utilizando su radio de visión procede a intentar localizarlo (ver figura 24). Normalmente el objeto a buscar será otro automóvil que este en las proximidades. Esta función permite mirar todo el carril deseado, tanto por delante como por detrás, teniendo como límite el radio de visión.

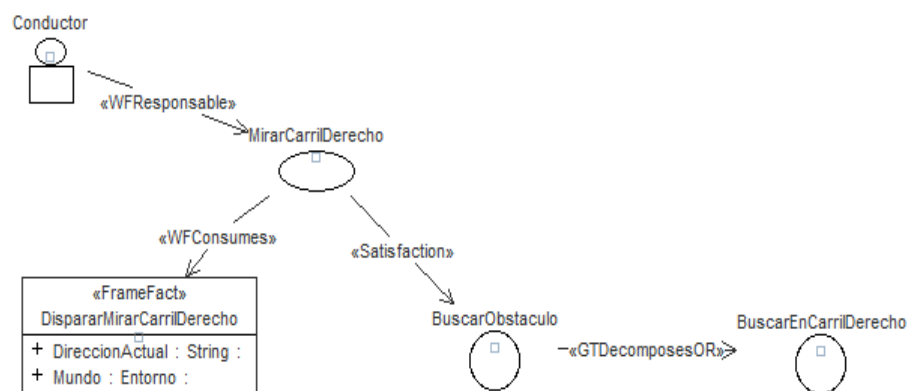


Figura 24: Búsqueda de un objeto en el carril derecho.

Al *mirar en el carril izquierdo* el conductor desea buscar un objeto en el carril izquierdo más inmediato, por lo que utilizando su radio de visión procede a intentar localizarlo (ver figura 25). Normalmente el objeto a buscar será otro automóvil que este en las proximidades. Esta función permite mirar todo el carril deseado, tanto por delante como por detrás, teniendo como límite el radio de visión.

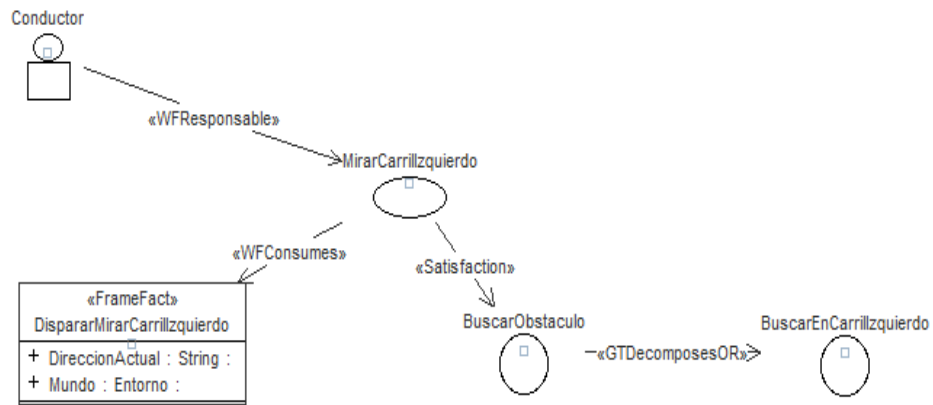


Figura 25: Búsqueda de un objeto en el carril izquierdo.

Con *mirar adelante* el conductor desea buscar un objeto delante suyo en el mismo carril (ver figura 26). Utilizando el radio de visión se puede ajustar la distancia a la que se desea observar entre lo inmediatamente más cercano y lo máximo que permite éste.

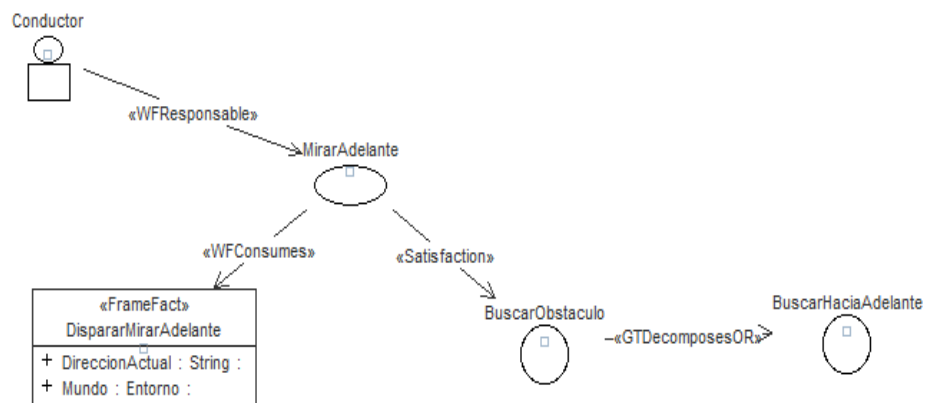


Figura 26: Búsqueda de un objeto delante del conductor.

El *mirar detrás* permite al conductor buscar un objeto detrás suya en el mismo carril (ver figura 27). Utilizando el radio de visión se puede ajustar la distancia a la que se desea observar entre lo inmediatamente más cercano y lo máximo que permite este.

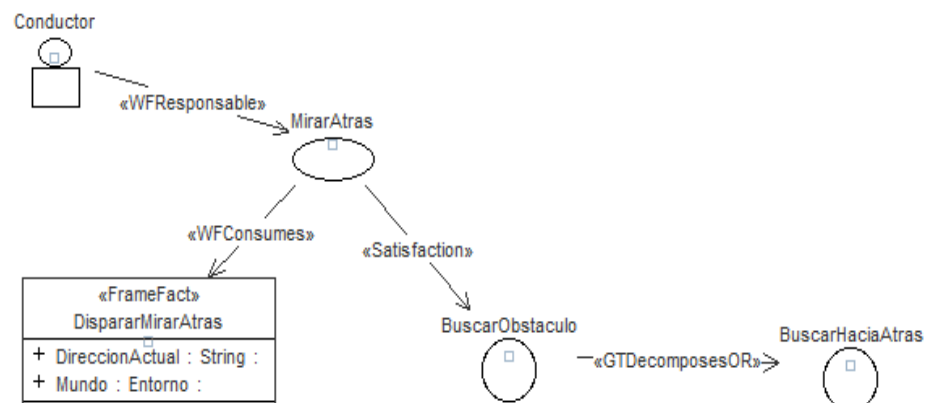


Figura 27: Búsqueda de un objeto detrás del conductor.

3.2.3. Actuaciones específicas

Las actuaciones específicas son comportamientos complejos creados para abordar situaciones que requieren el uso combinado de varias acciones generales y útiles. Se producen cuando el conductor se enfrenta a un contexto recurrente en el entorno y formalizan un cierto proceso. Estas actuaciones específicas son: cruzar un ceda el paso, cruzar un stop, cruzar un semáforo y cruzar una intersección.

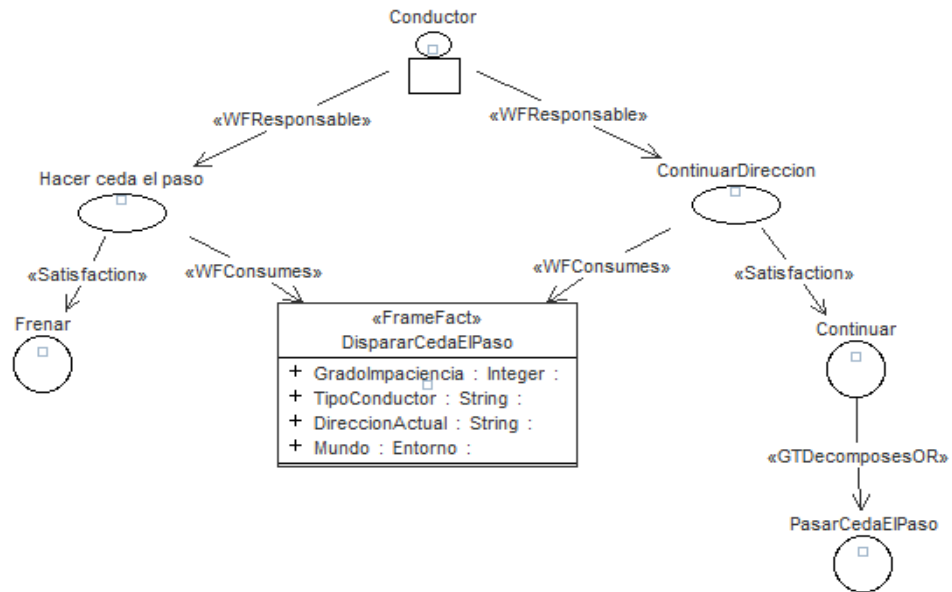


Figura 28: Realización del paso a través de un ceda el paso.

Cuando el conductor intenta *cruzar un ceda el paso* comienza observando qué llega a esta señal. Entonces procede a evaluar el entorno mirando a ambos lados suyos y decide qué acción realizar (ver figura 28). Las acciones posibles son: detenerse en el ceda el paso o por el contrario continuar. Dependiendo del tipo de conductor y del estado de ánimo que presente la actuación se realizará de distinta manera, ya que las valoraciones hechas sobre el entorno observado serán consideradas en función de su estado mental y comportamiento. En este caso la mayoría de los conductores no se detendrán en el ceda el paso salvo presencia muy cercana de otro vehículo.

La actuación *cruzar un stop* presenta grandes similitudes con la actuación anterior. El conductor observa que llega a un stop, entonces procede a evaluar el entorno mirando a ambos lados suyos y decide qué acción realizar (ver figura 29). Las acciones posibles son: detenerse en el stop o continuar su trayectoria actual. Según el tipo de conductor y el estado de ánimo que presente la actuación se realizará de distinta manera, ya que las valoraciones hechas sobre el entorno observado serán consideradas en función del estado mental y comportamiento. En este caso la mayoría de los conductores cumplirán con su obligación de realizar el stop aunque no haya vehículos en las inmediaciones.

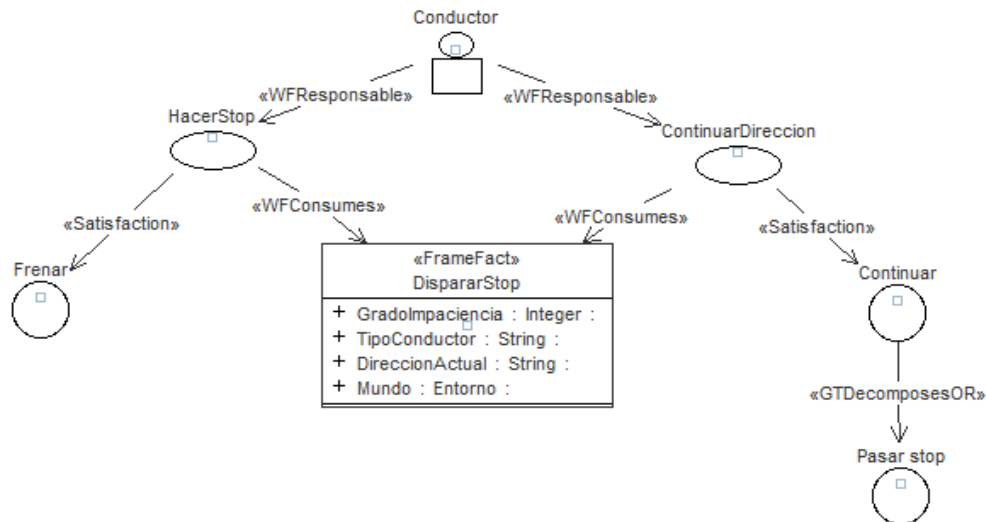


Figura 29: Realización del paso a través de un stop.

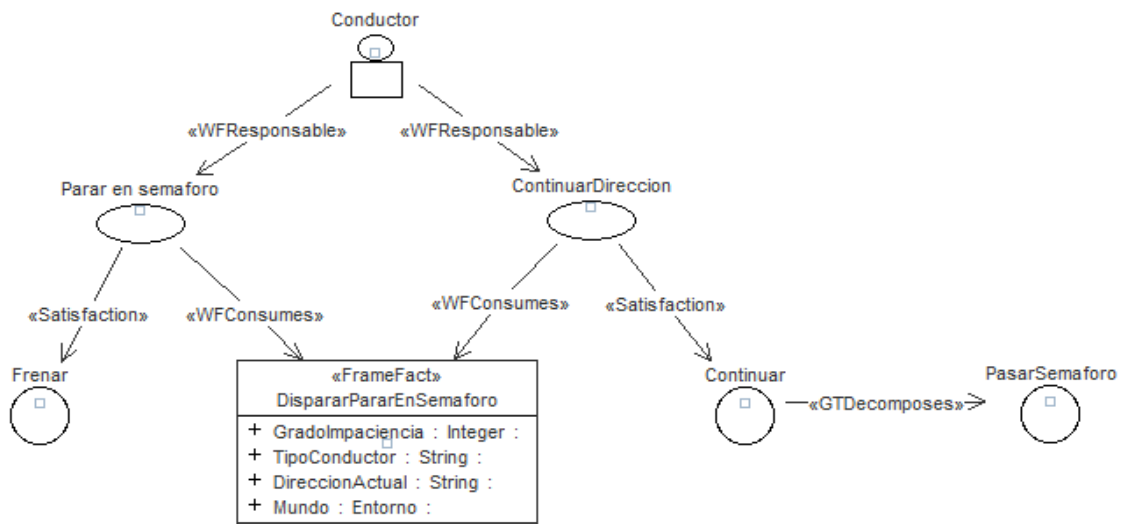


Figura 30: Realización del paso a través de un semáforo.

A su vez la actuación *cruzar un semáforo* también presenta grandes similitudes con las actuaciones anteriores, salvo que en este caso el conductor simplemente observa el semáforo sin mirar hacia los lados. La mayoría de los conductores al evaluar la situación se detendrán con el semáforo en rojo, habiendo más problemas cuando el semáforo está en amarillo. Dependiendo del tipo de conductor y del estado de ánimo se tomará la decisión de parar o por el contrario continuar con la trayectoria actual (ver figura 30).

Finalmente, la actuación *cruzar una intersección* es la que presenta mayores diferencias respecto a las anteriores. El conductor procede a comprobar la instrucción actual que presenta su ruta en el estado mental y si coincide con el entorno realizará un giro en el cruce para ajustarse a dicha instrucción. Si por el contrario no coincide entonces continuará su trayectoria actual por dicho cruce hasta salir del mismo (ver figura 31).

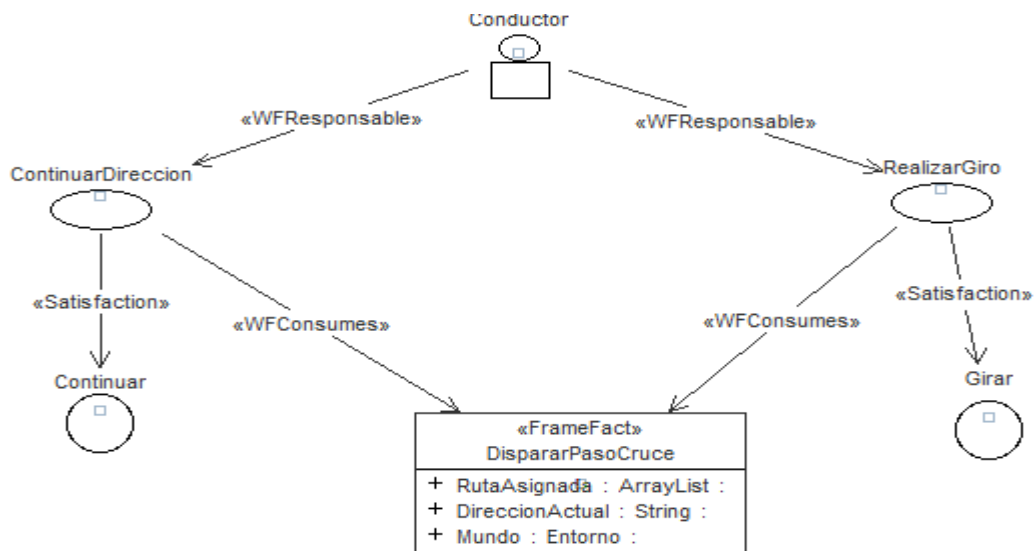


Figura 31: Realización del paso a través de un cruce.

3.3. Resumen del prototipo

En esta sección se han visto las principales características del prototipo presentado en este proyecto. La definición de estas características y las soluciones asociadas a ellas se enmarcan dentro del planteamiento inicial sobre la necesidad de mejorar una serie de deficiencias encontradas en otros trabajos relacionados.

Se ha comenzado a identificar una serie de requisitos que el sistema debía cumplir. Los principales son una alta flexibilidad en la definición de entornos, influencia en el tráfico del estado de ánimo de los conductores y considerar los diferentes tipos de vehículos disponibles. Para definir la implementación de estas características se han establecido clasificaciones asociadas a las mismas. Se han diseñado tres tipos de entorno básicos (autovías, secundarias y ciudades), aunque el sistema está preparado para simular en el futuro entornos mixtos. Los conductores se han clasificado según su actitud hacia la conducción en agresivos, normales y moderados. Su comportamiento también es influido por un parámetro de impaciencia. Éste intenta simular el estado de ánimo de los conductores y permite diferenciar a los conductores del mismo tipo. Respecto a los vehículos, el sistema considera el impacto que sus características tienen en el tráfico, ya que permiten a los conductores realizar las maniobras con diferentes parámetros.

Una vez hecho esto se procedió a modelar los agentes de la simulación con la herramienta IDK, para seguidamente llevar a cabo una implementación básica del sistema deseado. Los agentes conductores emplean la información sobre su propio perfil y el entorno para tomar decisiones realistas acerca de la conducción. Los vehículos se limitan a cumplir las ordenes que los agentes conductor deseen realizar conforme a la información recibida del entorno.

El sistema en ejecución carga mediante archivos XML los entornos para la simulación. Permite al usuario de la aplicación realizar sus propios entornos, otorgando la flexibilidad solicitada. Durante y después de la ejecución, el prototipo dispone de una serie de estadísticas básicas acerca de la simulación. Estas permiten obtener datos sobre pruebas con distintas configuraciones, a partir de los cuales elaborar y validar hipótesis sobre la capacidad de influir en el tráfico que tienen los distintos comportamientos de los conductores.

4. Pruebas y resultados.

En esta sección se procede a comentar una pequeña batería de pruebas realizadas con el prototipo desarrollado, observando las mismas y comentando si se acercan a las situaciones que ocurren en la vida real. Esto es de gran ayuda para poder verificar la eficacia y realismo del prototipo en el contexto para el cual ha sido creado. Las pruebas fueron divididas en tres grupos diferenciados según el tipo de entorno sobre el que se realizan: pruebas en autovía, pruebas en vía secundaria y pruebas en ciudad. La longitud de la simulación con la que la batería de pruebas ha sido creada es corta: diez vueltas a los circuitos de vías externas y cinco instrucciones en la ruta para el circuito urbano. La cantidad de conductores utilizados fueron: para la prueba de impacto del volumen de tráfico 32 conductores para volumen alto y 8 conductores para volumen bajo; para las pruebas de dominancia de un tipo de conductor 8 conductores para el dominante y 3 para cada uno de los restantes; y para el tipo de vehículo rápido o lento 4 conductores de cada tipo. También decir que la impaciencia se decidió que fuese aleatoria en todo momento. Los resultados que se deseaban comprobar son el número de intentos de adelantamiento y los posibles conflictos o situaciones con alto riesgo de accidente, los cuales ocurren cuando hay un riesgo elevado de colisión entre vehículos o ya se ha producido dicha colisión.

4.1. Pruebas en autovía

Las pruebas en autovía se centran en observar las estadísticas que obtiene el prototipo en un ejemplo de entorno que dispone de una autovía con dos carriles para cada sentido.

En la primera prueba se analiza el impacto del volumen de tráfico. Los resultados son los siguientes (ver figura 32):

- Volumen alto: se puede observar que las autovías favorecen el adelantamiento como en la vida real y más cuando hay gran cantidad de vehículos. Las situaciones conflictivas aumentan enormemente debido al colapso de los carriles.
- Volumen bajo: se observa la misma situación respecto a los adelantamientos que en el caso anterior, a la vez aparecen unas muy bajas tasas de peligrosidad.

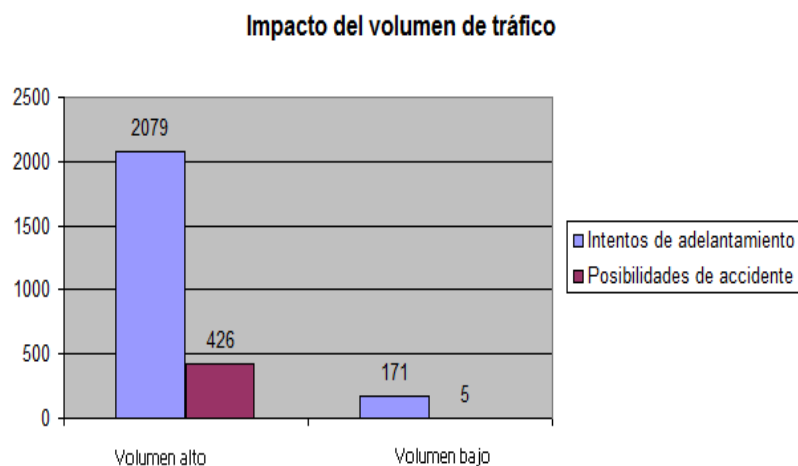


Figura 32: Comparación del volumen de tráfico en autovía.

En la segunda prueba se analiza el impacto de una mayoría dominante de conductores de un tipo:

Conductores agresivos (ver figura 33):

- Baja impaciencia: la cantidad de intentos de adelantamiento producidos es elevada pero las probabilidades de accidente no son altas. Esto es debido a la seguridad que aportan las autovías y a la baja impaciencia de los conductores.
- Media impaciencia: aquí aparecen muchas más posibilidades de accidente, al igual que los intentos de adelantamiento se acercan al doble de los ocurridos en el caso anterior. Se observa como la impaciencia juega un papel importante en la simulación.
- Alta impaciencia: en este último caso la cantidad de posibles accidentes se mantiene bastante baja, mientras que intuitivamente se esperaría que aumentase de forma importante. Observando los detalles de la simulación se observa que en las autovías los conductores agresivos con alta impaciencia tienden a diseminarse más por el entorno provocando menos situaciones de riesgo. En cuanto a los adelantamientos, aumentan medianamente también por la misma causa.

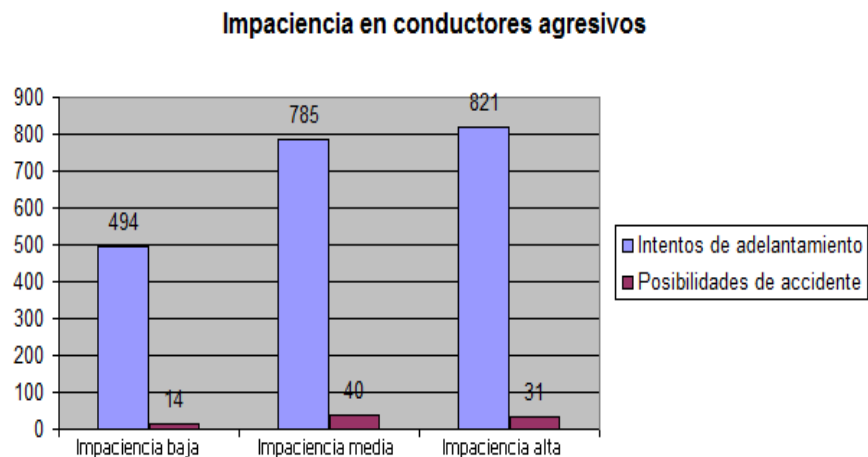


Figura 33: Comparación de distintas impaciencias en agresivos.

Conductores normales (ver figura 34):

- Baja impaciencia: se puede observar como las probabilidades de accidente son similares al apartado equivalente con conductores agresivos. Los intentos de adelantamiento disminuyen moderadamente.
- Media impaciencia: en este caso el grado de impaciencia presenta una gran influencia ya que incrementa tanto el número de intentos de adelantamiento como las posibilidades de accidente.
- Alta impaciencia: en este último caso se puede comprobar como ocurre lo mismo que en el apartado equivalente con conductores de tipo agresivo. Los conductores se dispersan más por el entorno produciéndose menos situaciones peligrosas al igual que los intentos de adelantamiento.

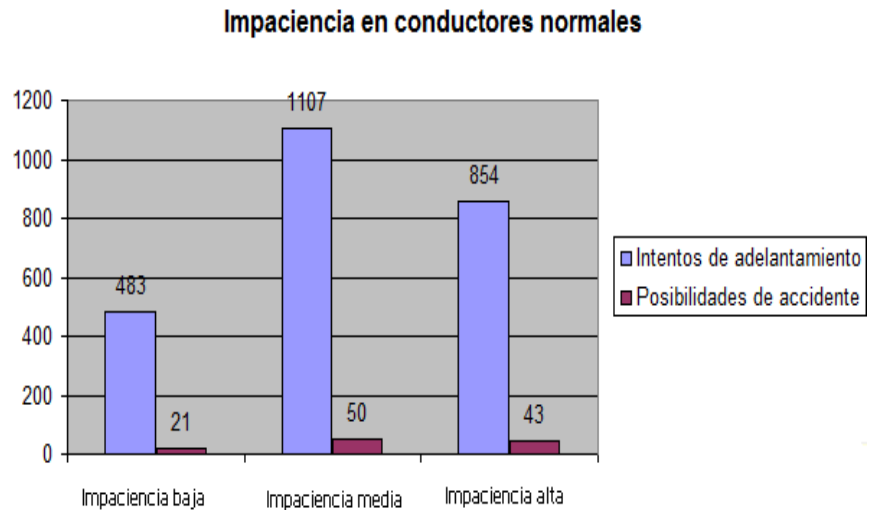


Figura 34: Comparación de distintas impaciencias en normales.

Conductores moderados (ver figura 35):

- Baja impaciencia: en este primer caso la cantidad de posibles accidentes es muy baja como cabría esperar. Los intentos de adelantamiento son mayores debido a que la velocidad de los vehículos es menor con este tipo de conductores.
- Media impaciencia: aquí los intentos de adelantamiento aumentan de manera moderada mientras que las posibilidades de accidente sí que aumenta a cerca del doble del caso anterior.
- Alta impaciencia: en este último caso la cantidad de intentos de adelantamiento se dispara, ya que la alta impaciencia junto a que la mayoría de conductores son moderados provocan muchas situaciones de este tipo. Por otra parte las posibilidades de accidente se llegan a doblar respecto al caso anterior también motivadas por esta impaciencia.

Impaciencia en conductores moderados

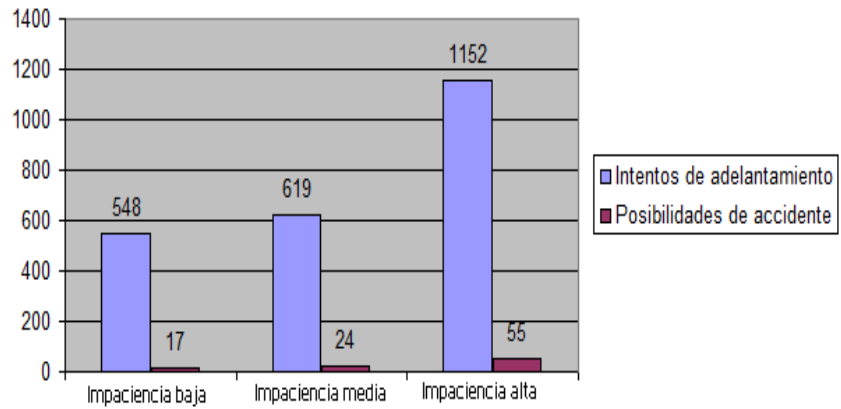


Figura 35: Comparación de distintas impaciencias en moderados.

En la tercera prueba se analiza el impacto de vehículos rápidos o lentos con la misma cantidad de conductores de cada tipo (ver figura 36):

- Vehículos rápidos: en esta situación la cantidad de intentos de adelantamiento y las posibilidades de accidente son medianamente elevados debido a la alta potencia de los vehículos.
- Vehículos lentos: en este caso la cantidad de intentos de adelantamiento y las probabilidades de accidente son moderados debido a la baja potencia de los vehículos.

Impacto del tipo de vehículo en el tráfico

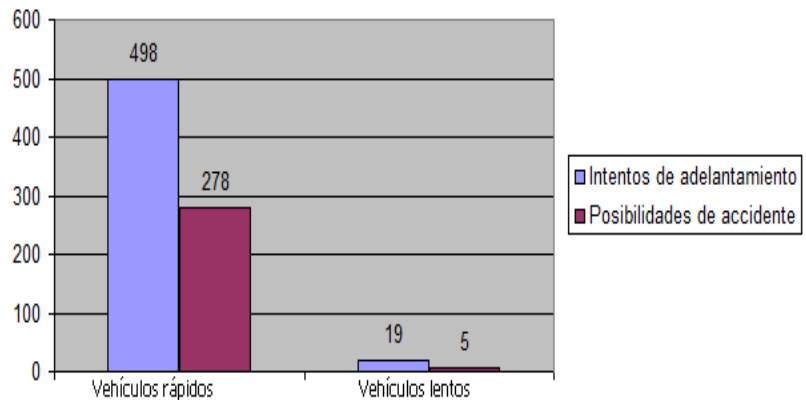


Figura 36: Comparación entre vehículos rápidos y lentos.

4.2. Pruebas en vía secundaria

Las pruebas en vía secundaria se centran en observar las estadísticas que obtiene el prototipo en un ejemplo de entorno que dispone de una carretera secundaria con un carril para cada sentido.

En la primera prueba se analiza el impacto del volumen de tráfico. Los resultados son los siguientes (ver figura 37):

- Volumen alto: se puede observar que las vías secundarias no favorecen el adelantamiento, tal y como ocurre en la realidad. Esta circunstancia se acentúa más cuando hay gran cantidad de vehículos. Sin embargo, las situaciones conflictivas disminuyen debido al colapso de los carriles que se produce y a la incapacidad para adelantar.
- Volumen bajo: en este caso la cantidad de intentos de adelantamiento disminuye, ya que hay menos vehículos circulando. Por el mismo motivo las posibilidades de accidente resultan casi nulas.

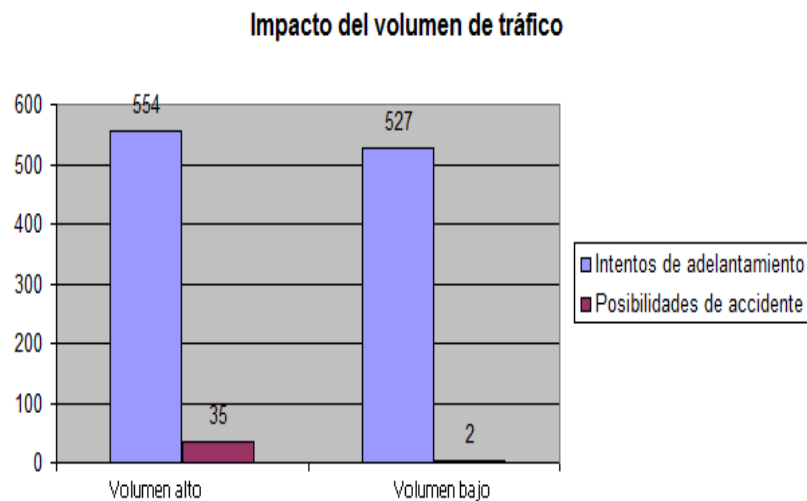


Figura 37: Comparación del volumen de tráfico en secundaria.

En la segunda prueba se analiza el impacto de una mayoría dominante de conductores de un tipo:

Conductores agresivos (ver figura 38):

- Baja impaciencia: en este caso se producen una cantidad importante de intentos de adelantamiento mientras que las posibilidades de accidente no son demasiado elevadas. Esto es debido a que los conductores no se deciden a completar un adelantamiento salvo que estén seguros y repiten la maniobra varias veces pudiendo provocar situaciones peligrosas.
- Media impaciencia: en este caso las posibilidades de accidente se mantienen moderadamente bajas, cuando cabría esperar un cierto aumento. Un análisis detallado de la simulación muestra que las probabilidades de accidente disminuyen debido a la baja cantidad de intentos de adelantamiento. Los adelantamientos suelen completarse la primera vez que se intentan y no se suelen hacer en lugares especialmente conflictivos, como puede ser un cambio de rasante o una curva.

- Alta impaciencia: en este último caso el estado de ánimo produce como se esperaba una gran cantidad de intentos de adelantamiento y un aumento de las situaciones potencialmente peligrosas.

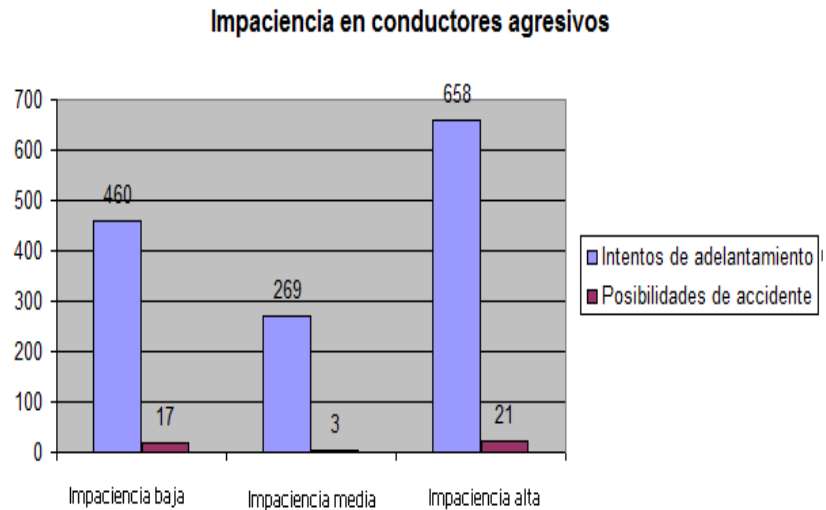


Figura 38: Comparación de distintas impaciencias en agresivos.

Conductores normales (ver figura 39):

- Baja impaciencia: aquí ocurre lo mismo que en la situación correspondiente del tipo agresivo, ya que hay una gran cantidad de intentos de adelantamiento y situaciones de riesgo debidas a la inseguridad creada.
- Media impaciencia: en este caso los intentos de adelantamiento se incrementan debido a la impaciencia de los conductores mientras que las situaciones de riesgo disminuyen ya que no aparecen apenas casos que provoquen inseguridad.
- Alta impaciencia: en este último caso los intentos de adelantamiento disminuyen drásticamente ya que los conductores tienden a distribuirse por el entorno. Las posibilidades de accidente aumentan ya que se toman muchos más riesgos.

Impaciencia en conductores normales

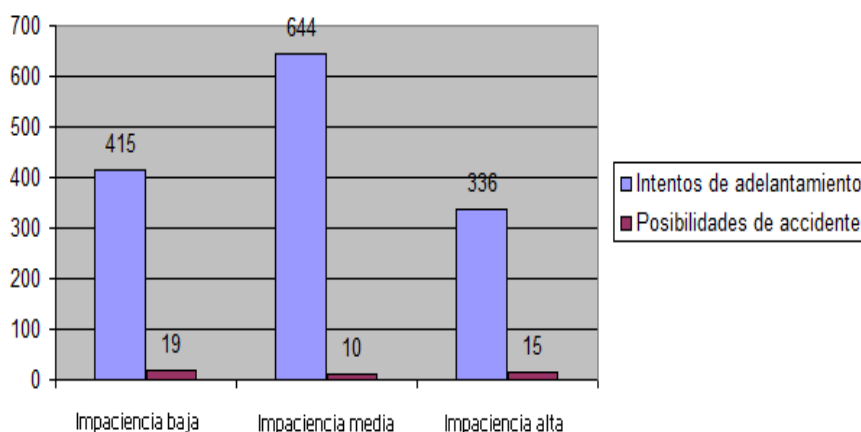


Figura 39: Comparación de distintas impaciencias en normales.

Conductores moderados (ver figura 40):

- **Baja impaciencia:** en este caso la cantidad de intentos de adelantamiento es enorme. Esto es debido a lo anteriormente comentado: los conductores abortan los adelantamientos por inseguridad y deben volver a comenzar la maniobra de nuevo. En cuanto a las posibilidades de conflicto, estas son bajas ya que este tipo de conductores presenta fuertes medidas para evitarlas.
- **Media impaciencia:** aquí ocurre algo similar al apartado anterior con baja impaciencia. La velocidad de los vehículos con conductor moderado sigue siendo baja y aunque no provoquen tanta inseguridad y se completen la mayoría de los adelantamientos, los demás conductores adelantan una y otra vez a los conductores moderados.
- **Alta impaciencia:** en este último caso los intentos de adelantamiento son menores debido a que no suele ser necesaria la reiteración para completar un adelantamiento satisfactoriamente. La cantidad de posibles accidentes se mantiene similar al anterior apartado con media impaciencia ya que los vehículos tienden a repartirse por el entorno con mayor facilidad.

Impaciencia en conductores moderados

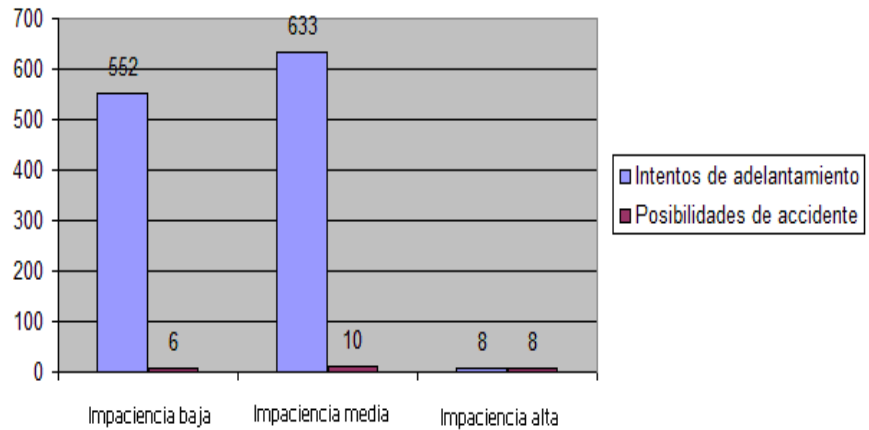


Figura 40: Comparación de distintas impaciencias en moderados.

En la tercera prueba se analiza el impacto de vehículos rápidos o lentos con la misma cantidad de conductores de cada tipo (ver figura 41):

- Vehículos rápidos: en este caso el número de situaciones peligrosas y el de intentos de adelantamiento es moderado. El motivo es que en este tipo de vías no influye en exceso la potencia del motor, salvo cuando el carril por el que se circula está despejado de vehículos.
- Vehículos lentos: este caso es muy similar al anterior ya que como se ha comentado en este tipo de entorno el vehículo no afecta tanto como en autovía.

Impacto del tipo de vehículo en el tráfico

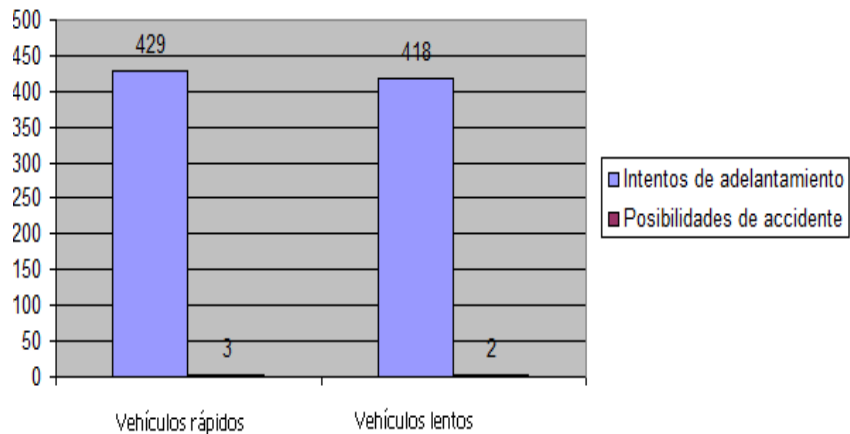


Figura 41: Comparación entre vehículos rápidos y lentos.

4.3. Pruebas en ciudad

Las pruebas en ciudad se centran en observar las estadísticas que obtiene el prototipo en un ejemplo de entorno que dispone de una ciudad con una complejidad moderada, presentando diversas calles principales, secundarias y callejones.

En la primera prueba se analiza el impacto del volumen de tráfico. Los resultados son los siguientes (ver figura 42):

- Volumen alto: en este caso la cantidad de vehículos en un punto determinado ocasiona consecuencias inmediatas. La congestión de vías urbanas implica una alta cantidad de situaciones conflictivas y muchas opciones de adelantamiento.
- Volumen bajo: en este otro caso el número de intentos de adelantamiento realizado es mucho menor y se produce una mínima cantidad de situaciones peligrosas. Ello se debe a que las vías urbanas no presentan aquí congestión alguna y el tráfico es fluido.

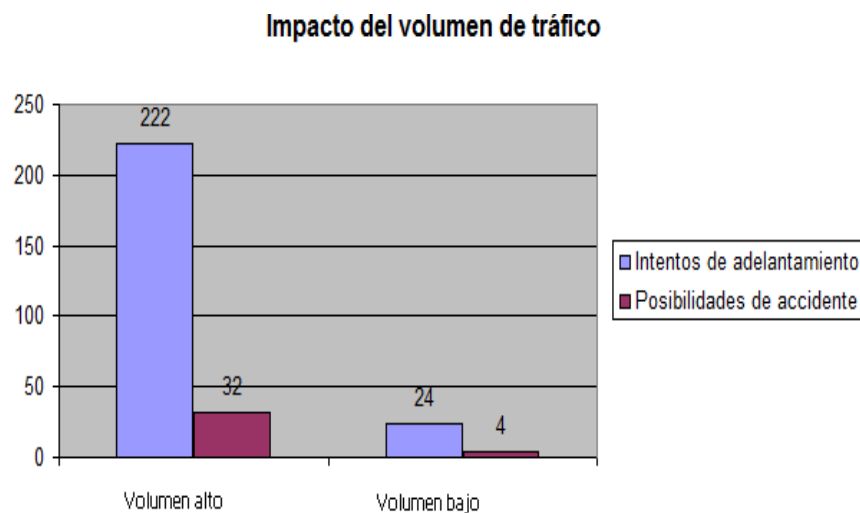


Figura 42: Comparación del volumen de tráfico en ciudad.

En la segunda prueba se analiza el impacto de una mayoría dominante de conductores de un tipo:

Conductores agresivos (ver figura 43):

- Baja impaciencia: en este caso la cantidad de situaciones conflictivas es muy baja y el número de adelantamientos en proporción al número de vehículos también. En ciudad, al ser las velocidades más reducidas, suele ser más complicado realizar adelantamientos efectivos.
- Media impaciencia: en este otro caso la cantidad de situaciones potencialmente peligrosas se incrementa respecto al caso anterior al igual que el número de adelantamientos. Este tipo de entorno es el que mejor muestra como afectan al tráfico los cambios de comportamiento de los conductores.

- **Alta impaciencia:** en este último caso la cantidad de situaciones conflictivas disminuye de nuevo al igual que el número de intentos de adelantamiento. Esto es debido a que los conductores interactúan muy poco entre ellos, adelantándose una vez y de manera muy rápida. Para conseguir sacar a la luz los problemas ocasionados por los conductores agresivos con alta impaciencia es necesario incrementar el número de vehículos participantes en la simulación.

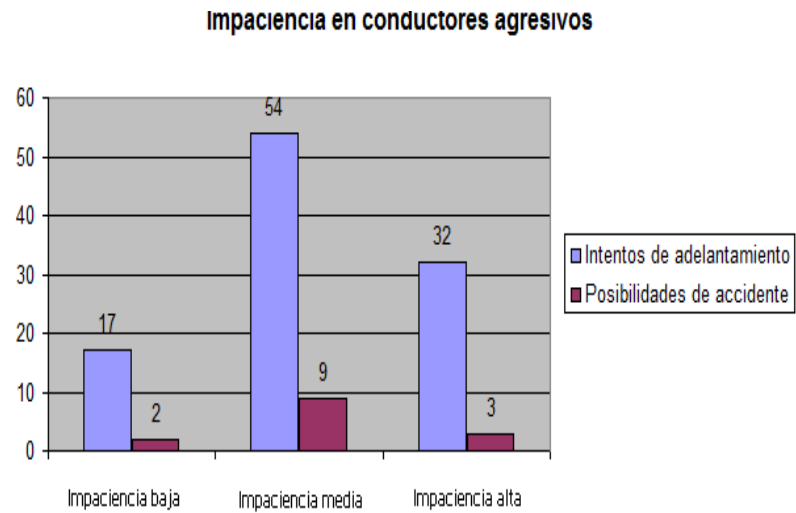


Figura 43: Comparación de distintas impaciencias en agresivos.

Conductores normales (ver figura 44):

- **Baja impaciencia:** en este caso el número de intentos de adelantamiento es moderado en proporción a los vehículos que se encuentran en la simulación, mientras que la cantidad de posibles situaciones de riesgo es un poco elevada.
- **Media impaciencia:** en este otro caso el número de intentos de adelantamiento se incrementa debido a que más conductores sienten la necesidad de adelantar. Las posibilidades de accidente disminuyen debido a una reducción de la inseguridad que aportan los conductores de este tipo, la cual también ocurría en otro tipo de vías.
- **Alta impaciencia:** en este último caso la cantidad de intentos de adelantamiento se dispara mientras que las posibilidades de accidente se mantienen. No hay la inseguridad creada cuando los conductores presentan impaciencia baja, lo cuál evita situaciones comprometidas.

Impaciencia en conductores normales

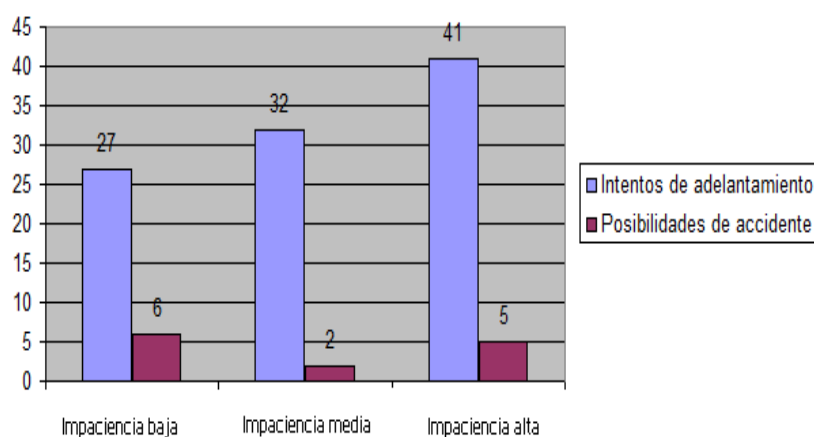


Figura 44: Comparación de distintas impaciencias en normales.

Conductores moderados:

- **Baja impaciencia:** en este caso los intentos de adelantamiento disminuyen debido a la baja impaciencia predominante entre los conductores mientras que la cantidad de situaciones comprometidas es bastante baja. La mayoría de estas situaciones de riesgo son debidas a la inseguridad que se genera con conductores de este tipo como ya se ha comentado previamente.
- **Media impaciencia:** en este otro caso los intentos de adelantamiento se incrementan, y en consecuencia la cantidad de situaciones peligrosas también. El incremento de adelantamientos es debido a adelantamientos entre conductores moderados, ya que en el caso anterior era difícil que se produjesen.
- **Alta impaciencia:** en este último caso la cantidad de adelantamientos y de posibles situaciones peligrosas se disparan. La alta impaciencia aquí juega un papel fundamental en el comportamiento de los conductores.

Impaciencia en conductores moderados

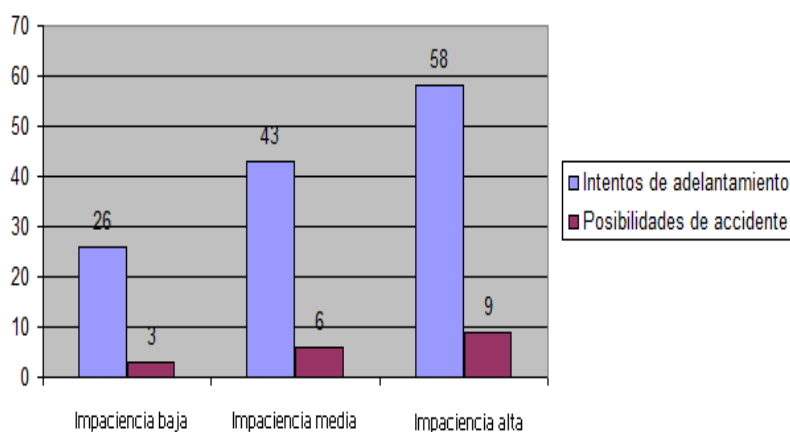


Figura 45: Comparación de distintas impaciencias en moderados.

La tercera prueba basada en vehículos rápidos y lentos no se considera en este entorno debido a que la velocidad máxima permitida es reducida. Ello impide a los conductores alcanzar altas velocidades por regla general, evitando la aparición de situaciones significativas que reseñar.

5. Conclusiones

Este proyecto se ha centrado en analizar los requisitos que debe satisfacer un marco flexible y realista de simulación del tráfico, y realizar un sistema cuyo diseño ofrece la base para incorporar y extender dichos requisitos. En particular, se ha analizado la importancia que para estas simulaciones tiene considerar el comportamiento de los conductores. A tenor de los experimentos realizados, trabajar con estos aspectos es fundamental para entender ciertas características del tráfico.

La identificación de los requisitos mencionados se ha basado en el estudio de otros trabajos en el mismo contexto. Se ha prestado especial atención a las limitaciones de dichos sistemas, tratando de elaborar soluciones (a veces parciales) para abordarlas. El sistema presentado ofrece una base para implementar la mayoría de estas soluciones, como se discute a continuación.

Se ha conseguido flexibilidad y que el contexto de la simulación sea variable gracias a la posibilidad de crear entornos de distintos tipos: autovías, carreteras secundarias y ciudades. Estos tipos constituyen la base sobre la que el usuario puede crear entornos propios de simulación. En cuanto a la relevancia del comportamiento de los conductores, se ha introducido una tipología de los mismos que influye en su evaluación de la situación, y por tanto en las decisiones que toman y la forma en la que las ejecutan. Esta tipología se complementa con un parámetro de influencia en el carácter llamado impaciencia. Éste permite hacer que los conductores adopten actitudes de conducción más agresivas conforme aumenta, produciendo más situaciones conflictivas. Otro requisito cumplido es la definición de comportamientos complejos y una toma de decisiones realista para los conductores. Esto se logra con la definición y tratamiento explícito del estado mental de los agentes, de tal forma que estos toman decisiones conforme a sus objetivos y a los parámetros obtenidos del entorno. Por otra parte, los vehículos se han diseñado sin capacidad de decisión, ya que como ocurre en la realidad todas las opciones son evaluadas y ordenadas por los agentes conductores. Sí se ha considerado la diferenciación entre las capacidades de los vehículos. La posibilidad de utilizar vehículos de gran cilindrada (como deportivos) o de media cilindrada (como los turismos normales) afecta a la capacidad de maniobra de los conductores, y por tanto a su efecto sobre el tráfico.

En cuanto al realismo del sistema y a los resultados obtenidos, se puede decir que la mayoría de las conclusiones obtenidas en la vida real se cumplen en el prototipo. Por ejemplo, es conocido que un comportamiento agresivo de un conductor genera una gran inseguridad en los conductores vecinos, a la vez que desencadena una gran cantidad de situaciones conflictivas. Sin embargo, determinados comportamientos de un conductor, que en apariencia no son potencialmente peligrosos, pueden también desencadenar inseguridad en los conductores que circulan alrededor, y por consiguiente reacciones inesperadas o incluso posibles situaciones conflictivas. Por tanto, se puede afirmar que un estado de inseguridad en el tráfico se produce tanto en los casos en que hay conductores demasiado agresivos, que realizan maniobras bruscas o temerarias, como cuando estos son excesivamente moderados, inseguros o parsimoniosos y sus maniobras son claramente dubitativas. Estas últimas afirmaciones se pueden verificar en la amplia batería de pruebas realizada sobre los diferentes tipos de vía.

Algunas observaciones respecto a estos experimentos son:

- En autovías se obtienen los resultados esperados respecto a la realidad. Se observa claramente como los distintos tipos de conductores producen comportamientos distintos en función de su estado de ánimo.
- En vías secundarias los resultados también se ajustan a la realidad, aunque en menor medida. Los conductores de la simulación tienden a juntarse demasiado, generando situaciones de alto riesgo que no ocurren con tanta facilidad en la vida real. Se puede observar que los conductores agresivos con una impaciencia alta toman riesgos innecesarios en este tipo de vías, adelantando donde no es posible o incluso permaneciendo en el carril de sentido contrario por largos periodos de tiempo.
- En ciudad los resultados son los esperados y se simula con bastante fidelidad el fenómeno de la ola verde. Este entorno es el que muestra con mayor claridad como los comportamientos de los distintos conductores afectan al tráfico. Esto es debido a que aquí es donde más cantidad de elementos de tráfico aparecen. Mientras que en otros entornos un conductor prácticamente sólo se ve afectado por las maniobras de otros conductores y tiene margen para adoptar medidas correctoras, éste se reduce en la ciudad por la necesidad de respetar esta gran cantidad de indicaciones. Por ello el impacto de un conductor que no respeta una señal, como puede ser no detenerse ante un semáforo en rojo o ante un stop, es mayor que en otros entornos.

Finalmente, se puede afirmar que la investigación, la especificación de requisitos, el prototipo y los experimentos realizados ofrecen una base a seguir en futuros trabajos de simulación de tráfico. El foco de esta propuesta está en el comportamiento de los conductores y su mutua influencia con otros factores, buscando ajustarse lo más posible a las situaciones reales de tráfico.

6. Trabajo futuro

En este apartado se recogen algunas ideas a tener en cuenta al realizar futuras investigaciones en la línea de este proyecto. Abordan fundamentalmente ampliaciones de la casuística y aspectos considerados en el modelado de conductores, vehículos, vías y otros elementos del entorno. Estas mejoras son:

- *Introducción de otros tipos de agente.* Un mayor realismo en la simulación requiere considerar agentes heterogéneos. Por ejemplo, en la ciudad los peatones siguen unas normas de circulación diferentes de los conductores, y su desplazamiento es completamente distinto al de los vehículos. Además de introducir los nuevos agentes, sería necesario ampliar el comportamiento de los agentes existentes para determinar las nuevas interacciones producidas. Una de estas nuevas interacciones podría ser establecer la forma en que los conductores interactuarían con personas a pie. También aparece la opción de crear un comportamiento complejo para los nuevos agentes y su consiguiente clasificación según su perfil de personalidad, como ya se ha hecho con los conductores.
- *Ampliación del comportamiento de los conductores.* Añadir parámetros o comportamientos nuevos tales como conductores bajo los efectos del alcohol o estupefacientes en diferentes medidas. Así se podría mostrar cómo afectan estos conductores al resto del tráfico y los problemas que pueden llegar a causar. Para simular comportamientos de este tipo sería interesante añadir algún tipo de ruido en el entorno percibido por el conductor y que éste tomase decisiones conforme a esa distorsión.
- *Mejora de los parámetros de los vehículos.* Actualmente sólo se tiene en cuenta la velocidad y aceleración máximas de un vehículo. Esta idea se puede desarrollar incluyendo parámetros adicionales de los vehículos que afecten al comportamiento de los conductores. Algunos de estos podrían ser: la capacidad de frenado del vehículo, la estabilidad presentada por el mismo o la capacidad de maniobra.
- *Introducción de condiciones meteorológicas.* Esta idea puede generar datos importantes acerca de cómo las inclemencias meteorológicas afectan al tráfico. Algunas de estas condiciones meteorológicas pueden ser: niebla, rachas de viento, hielo, lluvia o nieve abundante.
- *Extensión de los entornos.* Se han presentado tres tipos de vías que además pueden ser combinadas para formar entornos mixtos. Estos tipos básicos se pueden ampliar con tipos adicionales.

7. Referencias

- [Balan & Luke, 2006] Balan, G., y Luke, S., 2006. History-based traffic control. En *Proceedings of the Fifth international Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems* (Hakodate, Japón, 08 – 12 Mayo, 2006). AAMAS '06. ACM, Nueva York, NY, USA, 616-621.
- [Balmer et al., 2004] Balmer, M., Cetin, N., Nagel, K., y Raney, B., 2004. Towards Truly Agent-Based Traffic and Mobility Simulations. En *Proceedings of the Third international Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems - Volume 1* (Nueva York, NY, 19 – 23 Julio, 2004). International Conference on Autonomous Agents. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 60-67.
- [Blanchard et al., 1994] Blanchard, T. D., Lake, T. W., y Turner, S. J., 1994. Cooperative acceleration: robust conservative distributed discrete event simulation. En *Proceedings of the Eighth Workshop on Parallel and Distributed Simulation* (Edinburgo, Escocia, Reino Unido, 06 – 08 Julio, 1994). Arvind, D. K., Bagrodia, R., y Lin, J. Y. (Eds.), PADS '94. ACM, Nueva York, NY, 58-64.
- [Botia et al., 2008] Botia, J. A., Gonzalez, J. C., Gomez, J., y Pavon, J., 2008. The Ingenias Project: Methods and Tool For Developing Multiagent Systems. *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)* 6(6), 529-534, 2008.
- [Cao et al., 2006] Cao, J., Li, M., Huang, L., Qinsheng, R., y Li, Y., 2006. Towards Building an Intelligent Traffic Simulation Platform. En *Proceedings of the Sixth IEEE international Symposium on Cluster Computing and the Grid* (16 – 19 Mayo, 2006). CCGRID. IEEE Computer Society, Washington, DC, 64.
- [Cetin et al., 2003] Cetin, N., Burri, A., y Nagel, K., 2003. A large-scale agent-based traffic microsimulation based on queue model. En *Third Swiss Transport Research Conference* (Monte Verita, Ascona, 19 - 21 Marzo, 2003).
- [Cicortas & Somosi, 2005] Cicortas, A., Somosi, N. 2005. Multi-agent system model for urban traffic simulation. En 2nd Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence (Timisoara, Rumanía, 12 – 14 Mayo, 2005). SACI 2005.
- [Doniec et al., 2008] Doniec, A., Mandiau, R., Piechowiak, S., y Espié, S. 2008. A behavioral multi-agent model for road traffic simulation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 21(8), 1443-1454, 2008.
- [Dresner & Stone, 2008] Dresner, K., y Stone, P., 2005. Multiagent traffic management: an improved intersection control mechanism. En *Proceedings of the Fourth international Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems* (Utrecht, Países Bajos, July 25 – 29 Julio, 2005). AAMAS '05. ACM, Nueva York, NY, 471-477.
- [Fernandes & Nunes, 2008] Fernandes, P., y Nunes, U., 2008. Multi-agent architecture for simulation of traffic with Communications. En *ICINCO 2008 - International Conference on Informatics in Control, Automation & Robotics*, (Funchal, Portugal, May 2008).
- [Fuks, 2008] Fuks, P., 2008. Object-Oriented Road Infrastructure For Agent-Based Traffic Simulation. In *Symposium GIS Ostrava 2008* (Ostrava, República Checa, 27 - 30 enero, 2008).

- [Jin et al., 2007] Jin, X., Itmi, M., y Abdulrab, H., 2007. A cooperative multi-agent system simulation model for urban traffic intelligent control. En *Proceedings of the 2007 Summer Computer Simulation Conference* (San Diego, California, 16 – 19 Julio, 2007). Society for Computer Simulation International, San Diego, CA, 953-958.
- [Gilbert & Troitzsch, 2005] Gilbert, N., y Troitzsch, K. G., 2005. Simulation for the Social Scientist. Open University Press.
- [Lotzmann & Möhring, 2008] Lotzmann, U., y Möhring, M., 2008. A TRASS-based agent model for traffic simulation. En *22nd EUROPEAN Conference on Modelling and Simulation* (Nicosia, Chipre, 3 – 6 Junio, 2008). ECMS 2008, pp. 97-103.
- [Malta et al., 2009] Malta, L., Miyajima, C., y Takeda, K., 2009. A study of driver behavior under potential threats in vehicle traffic. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 10(2), 201-210, 2009.
- [Max-Neef et al., 1991] Max-Neef, M. A., Elizalde, A., y Hopenhayn, M., 1991. Human scale development: conception, application and further reflections. Apex Press.
- [Parachuri et al., 2002] Parachuri, P., Pullalarevu, A. R., y Karlapalem, K., 2002. Multi agent simulation of unorganized traffic. En *Proceedings of the First international Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: Part 1* (Bologna, Italia, 15 – 19 Julio, 2002). AAMAS '02. ACM, Nueva York, NY, 176-183.
- [Pavón et al., 2005] Pavón, J., Gómez-Sanz, J. J., y Fuentes, R., 2005. The INGENIAS Methodology and Tools. En: Henderson-Sellers, B., y Giorgini, P. (eds.), *Agent-Oriented Methodologies*, capítulo IX, 236-276. Idea Group Publishing.
- [Rigolli & Brady, 2005] Rigolli, M., y Brady, M., 2005. Towards a behavioural traffic monitoring system. En *Proceedings of the Fourth international Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems* (Utrecht, Países Bajos, 25 – 29 Julio, 2005). AAMAS '05. ACM, New York, NY, 449-454.
- [Sansores & Pavon, 2008] Sansores, C., y Pavón, J., 2008. An adaptive agent model for self-organizing MAS. En *Proceedings of the 7th international Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems - Volume 3* (Estoril, Portugal, 12 – 16 Mayo, 2008). International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, Richland, SC, USA, 1639-1642.
- [Sathyanarayana et al., 2008] Sathyanarayana, A., Boyraz, P., y Hansen, J. H. L., 2008. Driver behavior analysis and route recognition by hidden Markov models. En *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety* (Columbus, Ohio, USA, 22 - 24 Septiembre, 2008).
- [Sewall et al., 2010] Sewall, J., Wilkie, D., Merrel, P., y Lin, M. C., 2010. Continuum traffic simulation. En *The Eurographics Association and Blackwell Publishing Ltd*.
- [Soto et al., 2006] Soto, J. P., Vizcaino, A., Portillo, J., y Piattini, M., 2006. Modelling a Knowledge Management System Architecture with INGENIAS Methodology. En *Proceedings of the 15th international Conference on Computing* (21 – 24 Noviembre, 2006). CIC. IEEE Computer Society, Washington, DC, 167-173.

[Tezuka et al., 2006] Tezuka, S., Soma, H., y Tanifuji, K., 2006. A Study of Driver Behavior Inference Model at Time of Lane Change using Bayesian Networks. En *IEEE International Conference on Industrial Technology, 2006* (15 - 17 Diciembre, 2006). ICIT 2006, 2308-2313.

[Tumer et al., 2008] Tumer, K., Welch, Z. T., y Agogino, A., 2008. Aligning social welfare and agent preferences to alleviate traffic congestion. En *Proceedings of the 7th international Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems - Volume 2* (Estoril, Portugal, 12 – 16 Mayo, 2008). International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, Richland, SC, 655-662.

[Vasirani & Ossowski, 2009] Vasirani, M., y Ossowski, S., 2009. A market-inspired approach to reservation-based urban road traffic management. En *Proceedings of the 8th international Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems - Volume 1* (Budapest, Hungria, 10 – 15 Mayo, 2009). International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, Richland, SC, 617-624.

[Wahab et al., 2007] Wahab, A., Wen, T. G., y Kamaruddin, N., 2007. Understanding driver behavior using multi-dimensional CMAC. *6th International Conference on Information, Communications & Signal Processing* (Singapur, Singapur, 10-13 Diciembre, 2007), ICICS 2007, 1-5.

[Weiss, 2000] Weiss, G. (ed.), 2000: *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. The MIT Press.

8. Glosario

CMAC *Cerebellar Model Articulation Controller*

HLA *High Level Architecture*

IDK *INGENIAS Development Kit*

MAS *Multi-Agent System*

MVC *Modelo – Vista – Controlador*

TRASS *Traffic Simulation System*