

**PI121-01**

MITC: UN MODELO BASADO EN INTENCIONES PARA RESOLVER CONFLICTOS DE TRÁFICO DE  
FORMA COOPERATIVA

ALEJANDRO TRIANA CASTAÑEDA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN  
BOGOTÁ, D.C.

2014



PI121-01

MITC: SISTEMAS TRÁFICO INTELIGENTE. UN MODELO BASADO EN  
INTENCIONES PARA RESOLVER CONFLICTOS

**Autor:**

ALEJANDRO TRIANA CASTAÑEDA

MEMORIA DEL TRABAJO DE GRADO REALIZADO PARA CUMPLIR UNO  
DE LOS REQUISITOS PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN

**Director**

Ingeniero Enrique González Guerrero, PhD

**Comité de Evaluación del Trabajo de Grado**

**<http://pegasus.javeriana.edu.co/~PI121-01-TrafCoopIntencion/>**

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN  
BOGOTÁ, D.C.  
Enero, 2014

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS**

**Rector Magnífico**

Joaquín Emilio Sánchez García S.J.

**Decano Académico Facultad de Ingeniería**

Ingeniero Luis David Prieto Martínez

**Decano del Medio Universitario Facultad de Ingeniería**

Padre Sergio Bernal Restrepo S.J.

**Director Maestría en Ingeniería de Sistemas y Computación**

Ingeniero Enrique González Guerrero

**Director Departamento de Ingeniería de Sistemas**

Ingeniero César Julio Bustacara Medina

### **Artículo 23 de la Resolución No. 1 de Junio de 1946**

*“La Universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus alumnos en sus proyectos de grado. Sólo velará porque no se publique nada contrario al dogma y la moral católica y porque no contengan ataques o polémicas puramente personales. Antes bien, que se vean en ellos el anhelo de buscar la verdad y la Justicia”*

## CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	10
2.	ESTADO DEL ARTE EN SISTEMAS DE TRÁFICO INTELIGENTE .....	11
2.1	<i>Componentes de un Sistema de Tráfico Inteligente</i> .....	11
2.2	<i>Tráfico Inteligente Cooperativo</i> .....	16
2.3	<i>Simulación de Tráfico</i> .....	18
2.4	<i>Sistemas Multiagentes como Paradigma para Resolver Conflictos de Tráfico</i> .....	19
3.	METODOLOGÍA.....	22
3.1	<i>Diseño del Modelo Multiagente</i> .....	22
3.2	<i>Diseño del Modelo de Toma de Decisiones</i> .....	22
3.3	<i>Implementación del Modelo</i> .....	23
3.4	<i>Validación Experimental</i> .....	23
4.	AGENTES E INTERACCIONES .....	24
4.1	<i>Descripción General del Sistema Multiagente</i> .....	24
4.2	<i>Descripción del Ambiente</i> .....	24
4.3	<i>Descripción de los Agentes</i> .....	26
4.4	<i>Interacciones entre Agentes</i> .....	29
4.5	<i>Agentes de Tráfico y Comunicación</i> .....	32
5.	MODELO COOPERATIVO .....	33
5.1	<i>Definición de Intención</i> .....	33
5.2	<i>Descripción de los Vínculos Cooperativos Intencionales</i> .....	34
5.3	<i>Resolución de Conflictos y Benevolencia</i> .....	39
6.	MODELO TOMA DE DECISIONES.....	40
6.1	<i>Suposiciones Generales de un Conflicto de Tráfico como un Modelo de Teoría de Juego</i> 40	
6.2	<i>Formalización de un Conflicto de Tráfico como un Juego en Forma Normal</i> .....	40
6.3	<i>Estrategia para el Cálculo del Equilibrio de Nash</i> .....	42
6.4	<i>Conclusiones del Cálculo del Modelo de Teoría de Juegos</i> .....	44
7.	ARQUITECTURA DE IMPLEMENTACIÓN .....	45
7.1	<i>Arquitectura de MovSim</i> .....	45
7.2	<i>Componentes de Implementación de MITC</i> .....	46
7.3	<i>Diseño Estructural MITC</i> .....	47
7.4	<i>Componente de Extensión MovSIM</i> .....	50
7.5	<i>Modelo de Ejecución</i> .....	51
8.	VALIDACIÓN .....	54
8.1	<i>Diseño de Escenarios de Simulación</i> .....	54
8.2	<i>Variables</i> .....	55
8.3	<i>Resultados</i> .....	58
9.	CONCLUSIONES .....	64

10. BIBLIOGRAFIA .....66

## ABSTRACT

The urban traffic problems have become a constant that affects the different cities of the world. This problem, motivated by the exponential increase of vehicles, leads to the appearance of different complications such as environmental pollution, accidents and slow mobility. This project formulate MITC, a model of cooperation focus *conflicts resolution* for the *traffic agents* considering explicit communication of their *intentions*, allowing them to adjust their *decisions intelligently*, so as to reduce the *conflicts* and mitigate traffic congestion.

## RESUMEN

Los problemas de tráfico urbano se han convertido en una constante que afecta las diferentes ciudades del mundo. Este problema, motivado por el aumento exponencial de vehículos, conlleva la aparición de diferentes inconvenientes como la contaminación del medio ambiente, la accidentalidad y la lenta movilidad. Este proyecto formula MITC, un modelo de cooperación enfocado en la resolución de conflictos para los *agentes de tráfico* que tiene en cuenta la comunicación explícita de sus *intenciones*, permitiéndoles ajustar sus *decisiones* en forma *inteligente*, de modo que se reduzcan los *conflictos* y se mitigue la congestión de tráfico.



## RESUMEN EJECUTIVO

Los problemas de tráfico se han convertido en el principal inconveniente para la mayoría de ciudades alrededor del mundo. Los habitantes de una ciudad experimentan un aumento considerable en los tiempos de desplazamiento, lo que conlleva a fenómenos de contaminación, accidentalidad y deterioro en la calidad de vida de las personas. Las soluciones planteadas, comúnmente están encaminadas al aumento de la infraestructura vial, lo que resulta en nuevos inconvenientes relacionados a la complejidad, el costo y la subutilización. En este sentido, la incorporación de tecnologías de inteligencia artificial ha tomado gran interés en la comunidad, ya que permiten construir sistemas sensibles a las condiciones del ambiente (ej. la adaptabilidad de los tiempos de control de un semáforo, de acuerdo al flujo de vehículos en un determinado momento). Los ITS (Sistemas de Tráfico Inteligente) incorporan tecnologías de inteligencia artificial en diferentes ámbitos del tráfico urbano, entre ellos se encuentran el control inteligente de semáforos, la conducción automática de vehículos y la supervisión policial automatizada entre otros. Las técnicas utilizadas son variadas y diversas, entre ellas se encuentran la lógica difusa, las redes neuronales, los algoritmos genéticos y el aprendizaje de máquina. Así mismo, el paradigma de Sistemas Multiagente ha sido uno de los enfoques que más ha despertado interés en la comunidad, pues permite abordar de forma natural la complejidad a este tipo de sistemas, incorporando diferentes ventajas como el manejo distribuido de los problemas, el modelamiento de los actores de tráfico como entidades autónomas/proactivas (agentes) y la inclusión de oportunidades de cooperación entre dichos actores.

Este trabajo inicia con una descripción marco de los ITS en términos de sus componentes principales: 1.) los Sistemas de Control de Tráfico Urbano (UTC), 2.) las Redes de Tráfico Urbano y 3.) los Vehículos Inteligentes. Los UTC se refieren a los mecanismos utilizados por los semáforos para disminuir los retardos del flujo vehicular, haciendo uso de diferentes tecnologías como las redes de sensores, para capturar y adaptarse al estado del ambiente. Las Redes de Tráfico Urbano representan la infraestructura vial, comúnmente concebidas como un grafo direccionado para su estudio y modelado en los procesos de simulación. Finalmente, los Vehículos Inteligentes utilizan fundamentalmente técnicas de inteligencia artificial que les permite percibir y comprender su entorno de forma inmediata, asistiendo al conductor, o realizando un control automático del automóvil. A continuación, se describe el Tráfico Cooperativo, una nueva área de estudio de los ITS, que apoyada en los Sistemas Multiagente, busca modelar y diseñar sistemas de tráfico cuyos agentes actúan conjuntamente para lograr sus objetivos. La Cooperación entre agentes implica diferentes enfoques como la distribución de tareas (Colaboración), la planificación/sincronización (Coordinación), y la Resolución Conflictos como consecuencia de recursos limitados y metas antagónicas. La utilización de mecanismos Cooperativos, involucra necesariamente una estructura racional de los agentes para ejecutar sus tareas. Dichas estructuras pueden ser reactivas cuando solo tiene en cuenta las percepciones actuales para tomar sus decisiones, o proactivas cuando se construyen modelos del mundo para realizar predicciones. Sin embargo, este trabajo se inspira en un enfoque novedoso para construir el modelo de toma de decisiones de los agentes denominado Paradigma Intencional; donde la intencionalidad se refiere al hecho de dotar a los agentes de estados mentales: creencias, deseos, y esperanzas.

De acuerdo a lo anterior, este trabajo propone MITC, un Modelo de Tráfico basado en Sistemas Multiagente, en que los agentes cooperan comunicando sus intenciones de forma explícita para resolver Conflictos de Tráfico. En el Capítulo 3 se describe el Modelo Multiagente enfocado en cuatro requerimientos principales: 1.) Guiado hacia la Resolución de Conflictos, 2.) soportar altos índices de Concurrencia, 3.) tolerar el manejo de Situaciones Excepcionales (ej. el daño de un semáforo) y 4.) Escalable para grandes contextos geográficos. Inicialmente, se caracteriza el ambiente de un sistema de tráfico; conformado esencialmente por la red de infraestructura vial y las entidades externas. Las entidades externas son todas aquellos entes independientes al Sistema Multiagente y que son susceptibles de ser modificados por éste; entre ellas se encuentran los semáforos y los automóviles (El modelo sigue un paradigma *out of the box* orientado a la separación entre el controlador y artefacto en sí mismo, haciendo una distinción clara entre el objeto (ej. semáforo) y su controlador). Luego, se caracterizan cada uno de los agentes del sistema en términos de su meta principal, los sensores y actuadores. Entre los agentes principales se encuentran el TIA (Traffic Intersection Agent) y el DA (Driver Control Agent) para controlar los semáforos de una intersección y los vehículos respectivamente. Finalmente, se caracterizan las interacciones entre los agentes, suponiendo dos tipos de comunicación: 1.) Implícita, a través del ambiente (ej. la bocina de un automóvil) y 2.) Explícita, a través de tecnologías no convencionales como una red inalámbrica.

En el Capítulo 4, se describe el Modelo de Cooperación de agentes formulado como un Protocolo de Resolución de Conflictos. Los conflictos de tráfico suceden en área geográfica definida (ej. una intersección) y tienen una duración limitada en el tiempo. Inicialmente, se define el concepto de intención en términos de las metas de un agente de tráfico; dichas intenciones son clasificadas en una jerarquía de tres niveles, destacando las Intenciones Inmediatas (nivel 3) como las más importantes al ser las comunicadas en el protocolo de Resolución de Conflictos. Luego, se definen las intenciones para cada uno de los agentes, caracterizando las nuevas interacciones que surgen por su comunicación explícita. Finalmente, se definen las etapas del protocolo, enmarcado dentro del concepto de crédito; concepto que representa el beneficio que recibe un agente cuando un conflicto NO es resuelto a su favor. Esta concepción de crédito permite expresar la benevolencia de los agentes, entendida como una propiedad emergente que surge cuando los agentes *sacrifican* su propio beneficio en pro del bien global.

En el Capítulo 5, se presenta el Modelo de Toma de Decisiones para resolver los conflictos de Tráfico. Inicialmente, se caracterizan los Conflictos de tráfico como un modelo de Teoría Juegos, suponiendo un juego de información completa (los jugadores conocen *completamente* las estrategias de los otros, pues comunican sus intenciones) y perfecta (no hay incertidumbre acerca de las decisiones de los agentes). Luego, se plantea la solución como un juego en Forma Normal para encontrar el Equilibrio de Nash, teniendo en cuenta la relación asimétrica entre el agente iniciador del conflicto y los demás agentes.

Durante el Capítulo 6 se expone la Arquitectura de Implementación del modelo MITC. Para la implementación se utiliza MovSIM, un simulador microscópico multi-modelo y escrito en Java que soporta el diseño de múltiples escenarios como el cambio de línea y el control de semáforos. Inicialmente, se describen la arquitectura de MovSim en términos de sus cuatro componentes principales: 1.) MovSimCore: Implementa los algoritmos básicos del simulador. 2.) MovSim Viewer: Interfaz gráfica del simulador, 3.) MovSimConsumption: Implementa algoritmos para la medición del rendimiento energético y 4.) MovSimCommon: Funciones comunes

como el cálculo de funciones matemáticas y la escritura en log. Luego, se describe la Arquitectura de Implementación de MITC enfocadas en términos dos vistas principales: 1.) La vista de Conflicto: corresponde a la estructura de clases que implementan los mecanismos de Resolución de Conflictos y 2.) Vista de Ejecución: hace referencia a las clases que implementan las acciones de los agentes. Por último, se caracterizan los componentes de MovSim que fueron personalizados para garantizar la ejecución correcta de la implementación del modelo propuesto.

Finalmente, en el Capítulo 6 se realizan los experimentos para verificar la efectividad de MITC. La efectividad es evaluada en términos de tiempos de desplazamiento y la energía consumida de los vehículos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los problemas de tráfico urbano se han convertido en una constante en las diferentes ciudades del mundo. El número actual de automóviles se calcula en 600 millones, con un aumento anual estimado de 50 millones [1]. Diferentes factores como la ineficiencia en infraestructura y su planeación, o una débil conciencia pública del tráfico, incrementan la complejidad del problema [1]. Los problemas de tráfico pueden dividirse en tres tipos [2], [3]: 1.) De movilidad, relacionados con el tiempo de desplazamiento, 2.) De seguridad, especialmente enfocados a la prevención de accidentes y 3.) De medio ambiente, generalmente causados por las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Diversas aproximaciones y trabajos han surgido como respuesta a los problemas de tráfico; sin embargo, los ITS (Sistemas de Tráfico Inteligente) se constituyen como una de las alternativas más prometedoras y de interés en la comunidad [4], [5], [3]. Los ITS, buscan aplicar diferentes técnicas de inteligencia artificial como la lógica difusa [6], [7], las redes neuronales [8], [9], la computación evolutiva [10], y de manera más general el paradigma de agentes y Sistemas Multiagente [11], [12]. Los trabajos en ITS basados en Sistemas Multiagente han cubierto una gran cantidad de frentes, entre ellos se encuentran: 1.) Tráfico en carretera [13], [14]. 2.) Control de tráfico urbano (UTC) [15], [16], [17], [18], [19] y 3.) Sistemas de soporte a decisiones [13], [20]. En cada una de estas aplicaciones, los agentes toman decisiones de forma inteligente y cooperativa basados en su conocimiento del entorno.

En este documento se describe el proceso de desarrollo de MITC (Modelo Intencional de Tráfico Cooperativo), un modelo de tráfico basado en Sistemas Multiagente, en el cual los agentes cooperan comunicando sus intenciones de forma explícita. La comunicación de las intenciones permite a los agentes ajustar sus decisiones en forma inteligente, para reducir los conflictos presentados por escasez de recursos (la malla vial) y objetivos contrarios (antagónicos). En el primer capítulo, se describe un estado del arte en el área de los ITS enfocados a los problemas de congestión, que permite encontrar los requerimientos y características de sistemas de dicha naturaleza. A continuación, en los capítulos segundo al cuarto, se presentan el modelo de agentes, los mecanismos cooperativos y el sistema de toma de decisiones encaminados a la reducción de conflictos entre agentes de tráfico. En el capítulo quinto, se define la arquitectura de implementación del modelo MITC, lo que permite evaluar su efectividad sobre dos casos específicos de congestión de tráfico. Los experimentos realizados para evaluar el modelo son detallados en el capítulo sexto. Finalmente, en el capítulo séptimo se exponen las conclusiones desde la perspectiva de mitigación de conflictos entre agentes de tráfico.

## 2. ESTADO DEL ARTE EN SISTEMAS DE TRÁFICO INTELIGENTE

En este capítulo se presentan los Sistemas de Tráfico Inteligente (ITS) basados en Sistemas Multiagente (SMA) como alternativa de solución para los problemas de congestión de tráfico. Primero se definen los componentes principales de los ITS, en seguida se articulan las relaciones entre los SMA y los ITS desde el punto de vista del análisis y el diseño; y finalmente, se describen las características de los simuladores que deben ser tenidas en cuenta durante los procesos de validación al proponer nuevos modelos de ITS.

Los sistemas de tráfico y transporte han incrementado su complejidad debido a factores como el incremento de la demanda, la necesidad de reducción de costos y la disminución del impacto sobre el medio ambiente. Así mismo, estos sistemas involucran un gran número de elementos, como su tamaño y distribución en grandes espacios geográficos, y el antagonismo y competencia entre los individuos por recursos limitados [3].

Por lo anterior, existe gran interés en la aplicación de las técnicas de inteligencia artificial a los diferentes ámbitos de tráfico. Los ITS han sido utilizados en múltiples aplicaciones como la construcción de carreteras, el diseño de vehículos, la administración y el control de tráfico entre otros [4]. Sin embargo, las aplicaciones más importantes se han dado en el área de control de tráfico urbano, cuyo enfoque principal es buscar mecanismos que se adapten a un contexto complejo y puedan obtener un mejor desempeño progresivamente. Para ello, se busca dotar la infraestructura de tráfico de dos componentes principales: 1.) Artefactos tecnológicos que aumenten su sensibilidad al contexto donde se desenvuelven y 2.) Capacidad de toma de decisiones de acuerdo al estado del ambiente.

### 2.1 Componentes de un Sistema de Tráfico Inteligente

Los ITS hacen uso de diferentes tecnologías como el GPS, las redes Ad-Hoc y los sistemas de recomendación, para maximizar el uso de las carreteras [21]. De tal forma, las interacciones entre los actores (automóviles, semáforos, señales de tránsito e infraestructura vial) se han venido convirtiendo en mecanismos complejos donde los elementos de comunicación (señales de luz, direccionales, bocinas *etc.*), la cobertura de información (no solo se tienen en cuenta la localidad) y la adaptabilidad son esenciales en un sistema de ese tipo [22]. Los ITS se dividen en tres componentes a saber; 1.) Los Sistemas de Control de Tráfico Urbano (UTC por sus siglas en inglés), 2.) La Red de Tráfico inteligente y 3.) Los vehículos inteligentes.

#### 2.1.1 Sistemas de Control de Tráfico Urbano

Se refieren a los mecanismos de coordinación entre los semáforos para disminuir los retardos del flujo vehicular. Los algoritmos de coordinación pueden estar basados en datos históricos, en cuyo caso la estrategia de control es por tiempo fijo (*fixed time*) [22] o ser adaptables a las

condiciones del ambiente (flujos de vehículos, flujo peatonal, accidentes *etc.*) [22]. Dichos sistemas también son conocidos como UTC en tiempo real [8] o Sistemas de control adaptable (*traffic responsive signal control*) [23].

En este sentido, los UTC adaptativos utilizan un conjunto de tecnologías entre las cuales se encuentran:

1. Detector de bucle de inducción: es un sistema de comunicación y detección electromagnético que usa un imán para inducir corriente eléctrica en un alambre cercano. El bucle es conectado a un cable de extensión, que a su vez es acoplado a un detector vehicular. El detector transmite energía al bucle, generando un campo magnético con frecuencia constante. Cuando un objeto de metal se mueve sobre él, la frecuencia se incrementa [24].
2. Las Redes de Sensores desplegadas en la carretera (por ejemplo las líneas que entran y salen en una intersección). Estos sensores detectan el número de vehículos, la velocidad, la ocupación *etc.*, y transmiten la información a la señal más cercana [24].
3. La Visión por Computador a través de cámaras ubicadas en la infraestructura de señales, permiten determinar la cantidad de autos que entran en una intersección, accidentes y patrones de flujo entre otros [24].

#### 2.1.1.1 Etapas de un Sistema de Control de Tráfico Urbano

El funcionamiento de un UTC está dividido en tres etapas de control mencionadas a continuación [22]:

1. Recolección de Datos: es la etapa de obtención de los datos del flujo vehicular y peatonal. Para sistemas adaptativos esta recolección se hace en tiempo real, mientras que en los sistemas históricos el proceso es *off-line*.
2. Transmisión de Datos: consiste en el envío de la información a un sistema central donde se almacenan.
3. Establecimiento de parámetros: Corresponde a la generación e implantación de la estrategia de control. Entre los parámetros que suelen ser ajustados están [8]:
  - a. El ajuste de tiempo de ciclo  $C$  correspondiente a la longitud de tiempo para completar una secuencia de fases<sup>1</sup> [23].
  - b. El ajuste de *Split* definido como la longitud de ciclo  $C$  entre varios movimientos o fases.

---

<sup>1</sup> Una fase se refiere al estado de flujo de un conjunto de semáforos. Por ejemplo, una fase en una intersección simple está dado por el paso (luz verde) de los vehículos en un sentido, pero la detención (luz roja) en la vía perpendicular.

- c. El ajuste de *offset* que corresponde al tiempo de diferencia entre el comienzo de luces verdes en dos señales consecutivas [23].

### 2.1.1.2 Tipos de Modelos en un Sistema de Control de Tráfico Urbano

Como se observó en el apartado anterior, existe un sistema central que toma las decisiones de control y las distribuye al conjunto de señales<sup>2</sup>. Sin embargo, existe un conjunto de modelos denominados distribuidos, cuyas decisiones de control son tomadas localmente (generalmente las señales en las intersecciones). En este tipo de sistemas, aunque cada unidad local toma sus decisiones de forma independiente, existe sincronización con sus vecinos para conservar la coherencia del sistema [23].

### 2.1.1.3 Medidas de Rendimiento en un Sistema de Control de Tráfico Urbano

Las medidas de rendimiento (MDR) evalúan la efectividad de un Sistema de Control de Tráfico Urbano. Estas medidas están determinadas por las condiciones y el estado del ambiente.

A continuación se describen las MDR más comunes [8]:

- a. Longitud de cola: Mide el número de autos que ingresan en la entrada de una intersección.
- b. Consumo de combustible y emisiones de gas.
- c. Control de retardo: Retardo de vehículos por la presencia de una intersección.
- d. Retardo de paradas: Tiempo que se demoran los autos parados en una intersección.
- e. Retardo de desaceleración: Tiempo que se demoran los autos desacelerando.
- f. Retardo de aceleración: Tiempo que se demoran los autos acelerando.

## 2.1.2 Red de Tráfico Urbano

Una red de tráfico urbano es una estructura altamente compleja, usualmente modelada como un grafo direccionado. A continuación se explican los diferentes modelos de representación de una red de tráfico urbano, resaltando su importancia en el modelamiento microscópico de este tipo de sistemas.

### 2.1.2.1 Modelos de Representación de Malla Vial

Las redes de tráfico urbano pueden ser representadas a través dos enfoques mencionados a continuación [25]:

1. Sistemas de Referencia Lineal (LRS): es el modelo más común de representación, donde los segmentos de vía son representados por arcos y las intersecciones por nodos. Usualmente utilizados para hacer análisis topológico sobre la infraestructura de red,

---

<sup>2</sup> Debido al alto componente de sincronización y coordinación, este tipo de sistemas han sido ampliamente utilizado alrededor del mundo [23].

pero a su vez insuficientes para realizar análisis microscópico debido a su dificultad de representar la posición del vehículo.

2. Sistemas de Representación basados en línea (LBS): utiliza mecanismos de representación con diferentes niveles de abstracción para facilitar el análisis microscópico. A continuación, se realiza un acercamiento a este tipo de modelos, ya que es la aproximación utilizada a lo largo de este trabajo.

### 2.1.2.2 Modelos de Representación Basados en Línea

En un modelo LBS existen diferentes niveles de abstracción para representar una red de tráfico. Los niveles de abstracción LBS se ilustran en Figura 1 y son descritos a continuación [25]:

1. Líneas centrales de carretera: constituyen la representación natural de la carretera.
2. Calzada: representa las vías de una carretera sobre el mismo sentido.
3. Líneas: es una sola carretera sobre una calzada para un flujo de vehículos.
4. Nodo: es un *endpoint* para cada línea y un punto de conexión para otras líneas.
5. Intersecciones: es un punto de conexión de una o más vías.

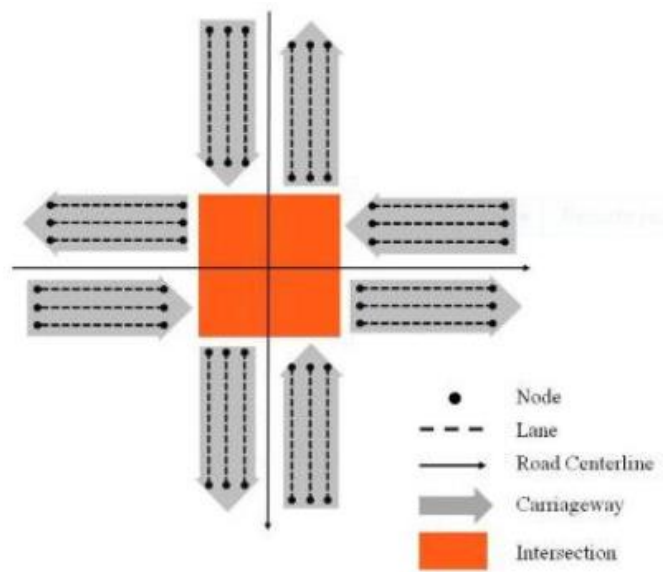


Figura 1. Modelo LBS [25]

### 2.1.3 Vehículos Inteligentes

Los vehículos inteligentes utilizan fundamentalmente técnicas de inteligencia artificial que les permite percibir y comprender su entorno de forma inmediata, asistiendo al conductor, o reali-



zando un control automático del vehículo [26]. En este sentido, los sistemas vehiculares autónomos han adquirido mayor protagonismo, ya que los procesos de toma de decisiones pueden ser ejecutados de forma ágil a partir de la información del ambiente que los rodea.

Los sistemas vehiculares, pueden ser implementados como sistemas autónomos (cuya información de instrumentación se encuentra centralizada en el vehículo) o sistemas cooperativos (cuya información de asistencia proviene de otros elementos como los semáforos, las carreteras, o inclusive los otros vehículos). El desarrollo de diferentes tecnologías ha permitido el avance y popularización de los vehículos autónomos, entre ellas se encuentran:

1. Redes Ad-Hoc: denominadas redes VANET (Vehicular Ad Hoc Networks), son redes móviles que permiten la comunicación entre vehículos y fuentes externas como las carreteras [27].
2. Sensores: proporcionan información de la velocidad, las distancias entre los carros, entre otros.
3. Visión por Computador: a través de la captura de imágenes se pueden detectar cambios de línea para la prevención de colisiones [26].
4. Sistemas de Geo-referenciación: el mejoramiento en la fiabilidad de los GIS (Sistemas Información Geográfica) permite asistir a los conductores, sugiriendo rutas de acuerdo a las condiciones de tráfico [26].

### 2.1.3.1 Conductores

Para un mejor aprovechamiento de las tecnologías mencionadas en el apartado y determinar su efectividad, es necesario modelar el comportamiento de las personas cuando conducen sus vehículos. Cuando una persona toma su automóvil para ir desde un punto  $A$  a un punto  $B$  surgen algunas características y/o situaciones mencionadas a continuación:

1. El conductor tiene una serie de pre-concepciones acerca del viaje. Entre ellas están:
  - a. Desea llegar a su destino  $B$  en el menor tiempo posible.
  - b. Desea llegar sin ningún inconveniente (accidente, errores mecánicos *etc.*).
2. El conductor genera un plan de acuerdo a:
  - a. Su pre-concepción del viaje.
  - b. A su experiencia (ej. la autopista los días miércoles suele estar congestionada).
  - c. La información exógena (medios de comunicación, GPS *etc.*)
3. El conductor ejecuta el plan. En este sentido, pueden ocurrir dos situaciones:
  - a. El plan es ejecutado normalmente.
  - b. El plan es modificado debido a diferentes situaciones como incidentes, congestión *etc.* Sin embargo la meta (llegar al destino  $B$ ) nunca es abortada.
  - c. La meta es modificada (ej. un accidente completamente bloqueante).

En este sentido según Rossetti [21], se pueden establecer las siguientes características de un conductor:

1. Puede determinar sus objetivos de forma autónoma, así como las acciones para llegar a ellos.

2. Interactúa con los otros conductores, con las señales de tránsito o fuentes de información exógena para modificar sus acciones.
3. Se adapta de forma autónoma a las condiciones del ambiente, algunas veces modificando sus planes iniciales.

## 2.2 Tráfico Inteligente Cooperativo

Los ITS presentan una mayor fiabilidad si los diferentes componentes interactúan de forma conjunta para lograr un objetivo común. En los sistemas de tráfico cooperativo se involucran dos aspectos: El primero, está relacionado a la forma en que se ejercen los procesos control y el segundo, a los mecanismos de comunicación entre los actores involucrados [13]. En este sentido, el control puede ejercerse de dos formas: 1.) Distribuida, si cada actor ejecuta sus acciones de forma autónoma pero coordinada con los demás y 2.) Centralizada, cuando existe un actor coordinador las acciones de los demás agente.

En el trabajo presentado por Kato [28], se exponen diferentes enfoques cooperativos, en el cual los vehículos coordinan sus acciones en escenarios como el cambio de línea y los sobrepasos. Yu [29] en su trabajo, propone un modelo de velocidad adaptativo que permite a los carros hacer seguimiento coordinado en carretera. En el modelo propuesto por Guo [30], se describe un algoritmo basado en teoría de juegos, en el cual los diferentes semáforos coordinan sus acciones mediante un proceso de teoría de juegos.

Por otra parte, diferentes trabajos han presentado aproximaciones de control cooperativo de semáforos para lograr mejores objetivos de control. Balaji, presenta dos modelos cooperativos de señales de tráfico basado en aprendizaje por refuerzo [17] y lógica difusa [31]. Cada señal toma sus decisiones de forma autónoma (sin un control centralizado), comunicando la información de tráfico a sus vecinos para tomar mejores decisiones. Así mismo, Chen propone una arquitectura denominada ACTAM, que permite un control de tráfico dinámico, adaptativo y descentralizado [13].

### 2.2.1 Agentes y Sistemas Multiagentes en ITS

Los problemas de tráfico son esencialmente complejos y distribuidos, sistemas de esta naturaleza necesitan un enfoque adecuado para su estudio, razón por la que se ha despertado gran interés en el paradigma de agentes, gracias a su capacidad de actuar conjuntamente de forma distribuida para resolver problemas complejos [32].

Un agente, “es una entidad que encapsula datos y comportamiento, siendo capaz de realizar una tarea de forma autónoma y proactiva” [33]. Comúnmente, los agentes son dispuestos en organizaciones, donde actúan conjuntamente de forma cooperativa para lograr un objetivo. Este enfoque es conocido como Sistemas Multiagente [13], [34].

### 2.2.2 Cooperación en Sistemas Multiagentes

La cooperación, permite a los agentes mejorar su rendimiento y optimizar su comportamiento, las habilidades y los recursos del sistema [35]. Según Ferber [34], la cooperación entre agentes puede definirse desde el paradigma de las 5C descrito a continuación:

1. Colaboración: Se refiere a la distribución de las tareas y los recursos entre los agentes para lograr un objetivo.
2. Coordinación: Orientado a cómo los agentes planifican, articulan y sincronizan sus acciones para lograr un resultado coherente.
3. Resolución de Conflictos: Está relacionado a las estrategias que utilizan los agentes para resolver los problemas presentados por objetivos contrarios o recursos escasos.
4. Comunicación: Se refiere al envío de mensajes desde un emisor a un receptor. El mensaje es codificado por el emisor antes de ser enviado y decodificado una vez llega al receptor.

La cooperación entre agentes es una característica valorada en ITS cooperativos, ya que los problemas de congestión son causados principalmente por los conflictos presentados por infraestructura limitada y metas contrarias. Ferber [34] presenta diferentes estrategias de resolución de conflictos, entre las cuales que se encuentran el arbitramento, la negociación y el uso de regulaciones.

### 2.2.3 Arquitectura Interna del Agente

En los ITS la cooperación condiciona la aparición mecanismos de toma de decisiones inteligente para poder resolver los conflictos. Dichos mecanismos están determinados por la estructura del agente, también conocida como su arquitectura.

Existen diferentes arquitecturas, un agente reactivo, solo tiene en cuenta las percepciones actuales para tomar sus decisiones [35]. Por el contrario, los agentes proactivos poseen mecanismos para construir modelos del mundo, realizar predicciones y detectar tendencias. Los agentes deliberativos, tienen en cuenta información histórica del ambiente, de sus percepciones y las consecuencias de sus acciones.

El paradigma intencional ha surgido como un enfoque novedoso a la hora de construir el modelo de toma de decisiones de los agentes. El concepto de intención, se refiere al hecho de dotar a los agentes de estados mentales: creencias, deseos, intenciones, esperanzas *etc.* [36]. Los estados mentales surgen de una postura psicológica que dicta la posibilidad de predecir el comportamiento humano a través de la atribución de actitudes (creencias y deseos) [36].

En este sentido, el modelo BDI (*belief-desire-intention*) representa uno de los enfoques más usados para construir agentes intencionales. BDI, es un modelo propuesto por Bratman, enmarcado dentro de la teoría del razonamiento práctico [36]. En este modelo, los agentes pueden diseñarse a partir de tres conceptos [35]:

1. Creencias: es el conocimiento local que tiene el agente sobre su entorno y de sí mismo.

2. Deseos: son los posibles objetivos que el agente puede alcanzar de acuerdo al contexto donde se encuentra.
3. Intenciones: las intenciones son la proyección de los deseos a futuro, enfocados a la acción para cumplir una meta general.

## 2.3 Simulación de Tráfico

Debido a la complejidad de los sistemas de tráfico y la dificultad de implantación de las nuevas tecnologías de ITS, la simulación de tráfico se ha convertido en un mecanismo efectivo de evaluación de sistemas de este tipo.

Los simuladores de tráfico generalmente se dividen en tres categorías [37]: Microscópicos, macroscópicos y mesoscópicos. Los modelos microscópicos consideran el estado individual del vehículo, como su localización y velocidad [38]. Los modelos macroscópicos se enfocan en la descripción del flujo de tráfico y sus medidas de efectividad como la velocidad. Los modelos mesoscópicos consideran tanto los aspectos de los modelos microscópicos y los modelos macroscópicos. Recientemente, han surgido simuladores nanoscópicos [37], que permiten modelar aspectos como el comportamiento de los conductores.

### 2.3.1 Clasificaciones de los Simuladores de Tráfico

Debido a la complejidad, las simulaciones de tráfico suelen ser ejecutadas en diferentes máquinas de forma distribuida. Un simulador de tráfico puede considerarse monolítico si toda la información relevante se guarda en un solo modelo, o por el contrario distribuido, si existen diferentes sub-modelos que conforman el modelo global [39].

Por otra parte, otra categorización se refiere a la granularidad del espacio de simulación. Acorde a eso, los simuladores pueden ser clasificados por ámbito de intersección, carretera o nivel de red [37]. Usualmente, los ámbitos de intersección y carretera permiten determinar problemas de sitio, por el contrario, los niveles de red permiten probar soluciones a nivel macro en una ciudad.

### 2.3.2 Simuladores de Tráfico en el Mercado

Existen diferentes simuladores que permiten modelar diferentes tipos de escenarios de tráfico. CORSIM es un simulador microscópico de tráfico que incluye FREESIM (un simulador de tráfico en autopistas) y NETSIM (Un simulador de tráfico de superficie en carretera). CORSIM soporta diferentes niveles de granularidad, pero no soporta simulación de comportamiento de conductores [37]. AISUM soporta simulaciones microscópicas, macroscópicas y mesoscópicas. Así mismo, AISUM permite dividir los aspectos dinámicos de grandes redes viales, eliminando los tediosos procesos de calibración [37].

Paramics [40] es un simulador microscópico que además de soportar diferentes niveles de granularidad, permite visualizaciones 3D y tiene soporte de ejecución distribuida. Paramics ha sido usado principalmente en el diseño de estrategias de vehículos autónomos. Igualmente DynaMIT [37] es un simulador mesoscópico diseñado por MIT, que permite la simulación de

diferentes escenarios de tiempo real, verificación de sistemas de información de tráfico entre otros. Por último, MovSIM es un simulador de tráfico multimodal, microscópico con granularidad a nivel de carretera e intersección.

### 2.3.2.1 Representación Microscópica de los Vehículos

En una simulación microscópica de tráfico, los vehículos son representados en términos de dos enfoques descritos a continuación:

1. Control de Velocidad (*car following*): Se refiere a cómo el carro controla su velocidad de acuerdo al auto que se encuentra en frente [41].
2. Control de Cambio de Línea: Se refiere al flujo en múltiples líneas de una carretera. Pueden ser clasificados entre mandatorios (MLC) o discrecionales (DLC). Los MLC son resultado de invariantes del ambiente, como obstáculos, cambios de geometría *etc.* En los DLC los autos cambian de línea cuando perciben mejores condiciones de tráfico [42]. Ante un cambio de línea se dan las siguientes cuatro situaciones:
  - Consideración de un cambio de línea.
  - Selección de la línea objetivo.
  - Aceptación de brechas en el carril objetivo.
  - Ejecución de la maniobra.

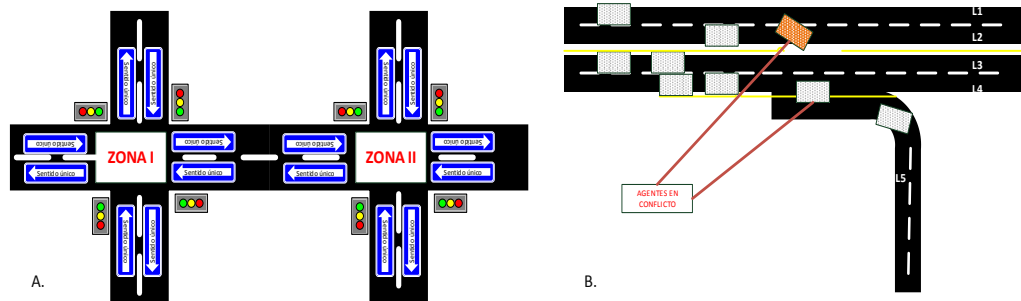
## 2.4 Sistemas Multiagentes como Paradigma para Resolver Conflictos de Tráfico

En este capítulo se describió un conjunto de tecnologías dirigidas a maximizar el uso de la infraestructura vial, que conllevan a mejorar los índices de movilidad, de consumo energético y de prevención de accidentes entre otros. Dichas tecnologías amplían el espectro de observación de los Sistema de Tráfico (por ejemplo la demanda, los accidentes *etc.*), permitiéndoles adaptarse de forma inteligente a un entorno cambiante. En este sentido, los Sistemas Multiagente se convierten en un paradigma para el diseño de ITS, enfocado principalmente en modelos de comportamiento entre los agentes de tráfico (vehículos, semáforos, supervisores *etc.*) y sus estructuras cooperativas usualmente basadas en coordinación.

Sin embargo, los problemas de congestión de tráfico son causados por conflictos. Dichos conflictos se presentan esencialmente por recursos limitados (la infraestructura vial) y por metas antagónicas entre los agentes de tráfico. En la Figura 2 se evidencian los dos conceptos en dos escenarios:

1. Escenario Doble Intersección: en este escenario los conflictos se presentan cuando alguno de los vínculos de las intersecciones (señalados como Zona I o Zona II) se satura por un flujo de vehículos, impidiendo el paso de los vehículos que circulan por la otra calle.
2. Escenario Cruce en Doble Calzada: en este escenario los conflictos emergen por el antagonismo de las metas entre los vehículos que circulan por el carril rápido *L1* o *L2*

y que desean tomar una vía perpendicular *L5*, y los vehículos que circulan por el carril lento *L3* o *L4*.



**Figura 2. A. Caso de Estudio Doble Intersección, B. Caso de Estudio Cruce por Carril Lento**

De acuerdo a lo anterior, En la Tabla 1 se realiza una comparación entre diferentes trabajos de tráfico cooperativo y el modelo propuesto en este documento.

**Tabla 1. Comparación Modelos Tráfico Cooperativo**

	AGENTES PARTICIPANTES	ENFOQUE COOPERACIÓN	TÉCNICAS COMPUTACIONALES	COMUNICACIÓN DE INTENCIONES
Modelo de Kato	Vehículos	Coordinación	Algoritmos de Control Microscópico	NO
Modelo de Guo	Semáforos	Coordinación	Teoría de Juegos	NO
Modelo Yu	Vehículos	Coordinación	Algoritmos de Control Microscópico	NO
Modelo de Bajali	Semáforos	Coordinación	Lógica Difusa / Aprendizaje por Refuerzo	NO
ACTAM	Semáforos	Coordinación	No Especificado	NO

MITC	Vehículos, Semáforos, Sensores, Supervisores	Resolución de Conflictos	de Teoría de Juegos	SI
------	--	--------------------------	---------------------	----

Como puede observarse, MITC propone un nuevo paradigma en la construcción de ITS cooperativos que otorgan ciertas ventajas mencionadas a continuación:

1. Está orientado a la Resolución de Conflictos, lo que permite abordar los problemas de congestión de una forma natural.
2. Su diseño está basado en una visión integral de ITS, incluyendo los diferentes agentes que pueden existir en el sistema.
3. El enfoque en Teoría de Juegos garantiza una solución racional de los conflictos para los conflictos presentados.

### 3. METODOLOGÍA

En este trabajo se utilizó un proceso metodológico dividido en 4 fases así:

1. Diseño del Modelo Multiagente.
2. Diseño del Modelo Toma de Decisiones Inteligente.
3. Implementación de los modelos.
4. Validación experimental.

En la fase 1, se diseñó el sistema Multiagente, enfocado en la caracterización de los agentes de tráfico y el diseño de los mecanismos cooperativos. El modelo de toma de decisiones inteligente se desarrolló para uno de los tipos de agente de tráfico, teniendo en cuenta la comunicación explícita de las intenciones como factor modificador del proceso. Ambos modelos fueron implementados en la tercera fase utilizando un simulador existente. La validación del modelo se realizó mediante un protocolo experimental utilizando la implementación, y enmarcada dentro del escenario seleccionado.

#### 3.1 Diseño del Modelo Multiagente

Para la construcción del modelo Multiagente, se utilizará un enfoque metodológico basado en agentes. En este trabajo se utilizaron dos enfoques para el diseño del modelo; uno de Análisis y otro de Síntesis.

En la etapa de Análisis se realizó la caracterización de los agentes que intervienen en los sistemas de tráfico de acuerdo a los trabajos previos y a la literatura, caracterizando dichos agentes en términos de sus metas, sensores y actuadores. Luego, se describieron las interacciones entre los agentes haciendo énfasis en los datos que se comunican. Durante la fase de Síntesis (inspirado en AOPOA [35]) se realizó una descomposición gradual de las metas de los agentes de tráfico para descubrir las intenciones y las nuevas interacciones que emergen al comunicarlas de forma explícita. Finalmente, se diseñó el Protocolo de Resolución de Conflictos enmarcado dentro de los requisitos de concurrencia y escalabilidad de un sistema de tráfico.

#### 3.2 Diseño del Modelo de Toma de Decisiones

En esta fase se construyó el modelo de toma de decisiones para un tipo de agente (vehicular), utilizando una técnica de inteligencia computacional (basado en teoría de juegos) y soportado en un enfoque benevolente (sacrificar beneficio individual por el colectivo).

El modelo de toma de decisiones del agente se diseñó bajo el paradigma percepción, decisión y acción [34]. Las percepciones están orientadas a la comunicación de las intenciones (ej. la intención de un automóvil vecino de hacer cambio de carril). El proceso de decisión tiene en cuenta la representación del modelo del mundo conformado por: 1.) El estado interno (ej. la velocidad actual), 2.) La secuencia de percepciones y 3.) Los efectos de las acciones tomadas (ej. la disminución súbita de velocidad por un cambio de carril).



De igual forma, se seleccionó la técnica de inteligencia computacional de acuerdo a los siguientes criterios: 1.) Coherencia con el modelo marco generado en la primera fase. Y 2.) Alineación con el tipo de agente seleccionado. Finalmente, se realizó el diseño detallado de toma de decisiones para el tipo de agente de tráfico seleccionado, mediante un refinamiento continuo e iterativo.

### 3.3 Implementación del Modelo

En esta fase, se realizó la implementación tanto del modelo intencional cooperativo, como del modelo de toma de decisiones del tipo de agente seleccionado.

Inicialmente, se seleccionó el simulador de tráfico y se realizaron las pruebas de concepto necesarias para su utilización. Dicha selección dependió del análisis de los siguientes criterios: 1.) Debe ser microscópico, 2.) Soportar mecanismos de distribución y 3) Soportar extensibilidad mediante un lenguaje de programación o un componente de comunicación (ej. Sockets). Por otra parte, se realizó la selección del framework de agentes de acuerdo a los modelos diseñados y las características del simulador de tráfico seleccionado (El *framework* seleccionado fue BESA [35]).

A continuación, se inició el proceso de construcción basado en micro-ciclos, concepto inspirado desde las metodologías ágiles. Un micro-ciclo es un período corto de tiempo donde se busca entregar un producto utilizable. Por lo tanto, se ejecutarán dos micro-ciclos, uno para el modelo cooperativo y otro para el modelo de toma de decisiones. Cada micro-ciclo se estructura de la forma *implementación-pruebas unitarias* para asegurar la calidad de cada componente desarrollado.

### 3.4 Validación Experimental

La validación experimental permitió evaluar la efectividad del modelo cooperativo en la reducción de conflictos, contribuyendo a la mitigación de los problemas de congestión de tráfico.

Inicialmente, se diseñó el protocolo experimental en términos de las variables y los experimentos a realizar. Entre las variables dependientes en una simulación de tráfico (conocidas como medidas de rendimiento), se tienen el tiempo promedio de viaje y la energía consumida. Como variables independientes, encontramos el volumen de tráfico, distribución de la velocidad, la configuración de las señales (semáforos) y la red vehicular entre otros.

Posteriormente, se diseñó el escenario de simulación de tráfico de acuerdo al protocolo. El entorno experimental en una simulación de tráfico, se compone por la configuración de la malla vial, la configuración de señales, entre otros. Finalmente, se ejecutaron los experimentos definidos en el protocolo, escribiendo los datos en archivos de datos legibles para su posterior procesamiento. Los datos fueron consolidados y analizados estadísticamente para la generación de las conclusiones de los experimentos.

## 4. AGENTES E INTERACCIONES

En este capítulo se describen los agentes y las interacciones generales del Modelo Intencional de Tráfico Cooperativo MITC. Inicialmente, se describen los agentes de sistema de acuerdo a las características de un ITS mencionadas en el capítulo anterior y se realiza el modelado de los agentes en términos de metas, sensores, actuadores, y sus relaciones con las entidades externas y el ambiente. Finalmente, se caracterizan las interacciones y los mecanismos de comunicación asociados.

### 4.1 Descripción General del Sistema Multiagente

Los sistemas de tráfico urbano son altamente complejos, inherentemente distribuidos y tienen recursos de infraestructura limitados. Debido a esto, el modelo Multiagente debe cumplir con los siguientes requisitos:

1. Enfocado en los Problemas de Congestión: los componentes y sus relaciones están encaminados en disminuir los conflictos entre los agentes de tráfico.
2. Altamente Concurrente: se debe soportar el gran número de interacciones entre los agentes, que usualmente se dan al mismo tiempo.
3. Robusto: soportar el manejo de situaciones excepcionales como el daño de sensores y semáforos entre otros.
4. Escalable: soportar el despliegue en ciudades de diferente tamaño y complejidad.

En este sentido, a continuación se describe el ambiente y los agentes de tráfico del modelo propuesto MITC. Junto al nombre de cada agente, aparece la sigla de identificación para una rápida referencia del agente en secciones posteriores.

### 4.2 Descripción del Ambiente

El ambiente para MITC está conformado por la red de tráfico urbano. Este ambiente posee las siguientes características:

1. Es parcialmente observable, debido a la complejidad y extensión geográfica.
2. Es dinámico y cambiante a lo largo del tiempo.

#### 4.2.1 Descripción de las Entidades Externas

Las entidades externas son todas aquellas entidades independientes al Sistema Multiagente (localizadas en el ambiente) y que son susceptibles de ser modificadas por este [16]. En la Tabla 2 se describen las entidades externas del modelo propuesto MITC.

Tabla 2. Entidades Externas

NOMBRE ENTIDAD	DESCRIPCIÓN
Light	Se refiere al objeto semáforo (sin su componente de control).
Car	Corresponde al objeto automóvil (sin su componente de control).
Traffic Sensor	Representa los diferentes objetos sensores capaces de detectar decisiones de tráfico.
Traffic Signal	Las señales determinan las reglas que gobiernan la malla vial, como la velocidad tope, las posibilidades de cruce de línea, el sentido, bloqueos <i>etc.</i>
Pedestrians	Peatones (independiente del medio de transporte) en una red urbana.
Human Control	Personas que participan en los procesos de control en un sistema de tráfico

#### 4.2.2 Vínculos Externos

Los vínculos externos se refieren a las interacciones existentes entre el Sistema Multiagente y las entidades externas que se encuentran en el ambiente. En la Figura 3 se ilustran los vínculos externos para Sistema Multiagente (SMA) y son descritos en la Tabla 3.

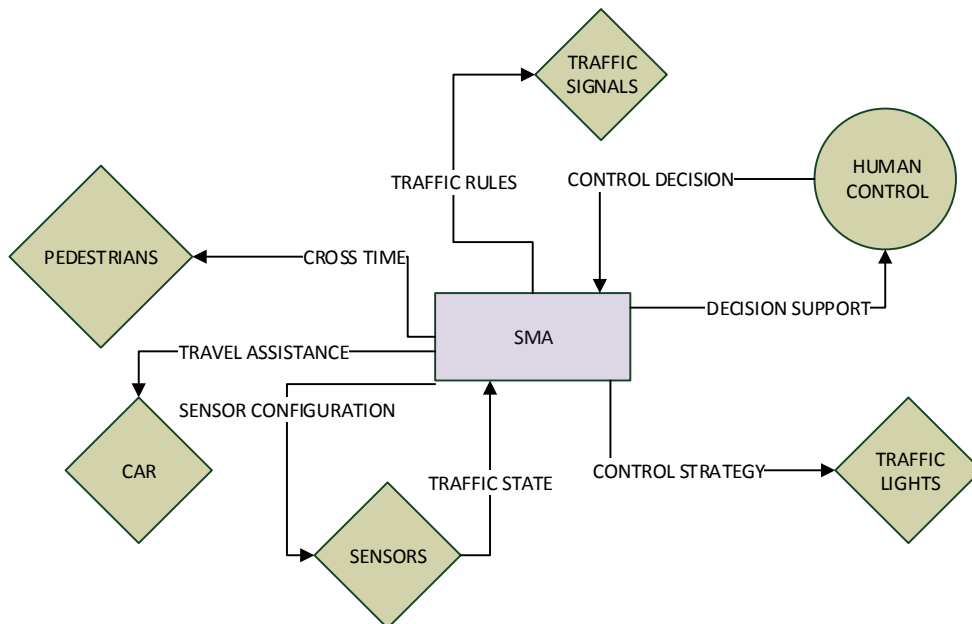


Figura 3. Diagrama de Vínculos Externos para SMA

Tabla 3. Vínculos Externos

VINCULO EXTERNO	DESCRIPCIÓN
Traffic State	Datos acerca del flujo de tráfico, velocidad promedio <i>etc.</i>
Sensor Configuration	Parámetros de funcionamiento del sensor, por ejemplo el tiempo de captura.
Cross Time	Tiempos de cruce de un peatón en una intersección. Este tiempo está directamente relacionado a los parámetros de control de un semáforo.
Traffic Rules	Estrategia de control para una señal de tráfico. Por ejemplo el tope de límite de velocidad.
Control Decision	Decisiones de control que toma un humano y que son obligatorias en su implantación. Por ejemplo una estrategia de ola verde.
Decision Support	Información asociada al soporte de toma de decisiones
Control Strategy	Estrategia de control para un semáforo. Por ejemplo el tiempo de fase o de ciclo.
Travel Assistance	Corresponde a los elementos para asistir a un automóvil cuando realiza un recorrido. Por ejemplo, distancia con otros automóviles, rutas, alertas de accidentes <i>etc.</i>

### 4.3 Descripción de los Agentes

De la Tabla 4 a la Tabla 9, se caracterizan cada uno de los agentes del sistema en términos de su meta principal, los sensores y actuadores asociados. Dichas descripciones suponen la existencia de tecnologías de última generación como la detección del flujo de peatones, aparición de sensores como GPS entre otros; sin embargo algunas tecnologías son opcionales (ej. el sensor de flujo de peatones) y su existencia permite una mayor efectividad del modelo propuesto.

Tabla 4. Descripción General de Agentes

NOMBRE DEL AGENTE	DESCRIPCIÓN
Traffic Intersection Agent – TIA	Corresponde al agente que controla los semáforos de una intersección. El control no solo se refiere a componentes intrínsecos (tiempo de ciclo, tiempo de fase y tiempo de <i>split</i> ) sino a otros aspectos como la comunicación con los TIA vecinos, los Driver Control Agent (DA) y otros agentes. En este sentido, el semáforo es un objeto del mundo que es manipulado por el control de semáforo.

Traffic Sensor Agent – TSA	Corresponde al agente capaz de detectar las condiciones tráfico. Estos agentes están distribuidos en la malla vial y pueden detectar las condiciones del ambiente (ej. los tiempos de velocidad promedio, incidentes entre otros).
Driver Control Agent – DA	Corresponde al agente que controla un automóvil. El control se refiere tanto a elementos intrínsecos (acelerador, freno, timón <i>etc.</i> ) como a elementos de comunicación con otros agentes. Nota: El vehículo y el conductor son tratados como una unidad a través de este agente.
Traffic Area Monitor Agent – TAMA	Corresponde al agente que monitorea información de áreas específicas del sistema de tráfico. Este agente permite consultar información multinivel del sistema de tráfico.
Traffic Supervisor Agent - TSUA	Este agente tiene las siguientes responsabilidades: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Visualizar diferentes situaciones de tráfico.</li> <li>– Soportar los procesos de toma de decisiones de los controladores humanos.</li> </ul>

Tabla 5. Caracterización TSA

NOMBRE		TRAFFIC SENSOR AGENT – TSA
Sensores	<b>Driver Load Performance Sensor – DLPS</b>	El sensor capta medidas de tráfico como: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Velocidad promedio de autos que pasan por el sensor.</li> <li>– El tiempo de retardo promedio de los autos que pasan por el sensor.</li> <li>– El volumen de autos para un periodo de tiempo <math>t</math> que pasan por el sensor.</li> </ul>
	<b>Pedestrian Sensor – PS</b>	Determina el número de peatones que esperan el paso en un semáforo.
Actuadores	<b>Configure Actuator – CA</b>	Actuador que permite establecer las configuraciones del sensor físico (ej. sus parámetros de calibración).
Meta	Proporcionar información de tráfico y generar métricas de desempeño del flujo de vehículos en un segmento vehicular. El segmento vehicular se refiere a la estructura propuesta en un Modelo de Representación Basado en Línea (LBS).	

Tabla 6. Caracterización TIA

<b>NOMBRE TRAFFIC INTERSECTION AGENT – TIA</b>		
<b>Actuadores</b>	<b>Set Control Parameters Actuator – SCPA</b>	Establece los parámetros de control de un semáforo. Los parámetros son: <ul style="list-style-type: none"> <li>– El ajuste de tiempo de ciclo.</li> <li>– El ajuste de <i>split</i>.</li> <li>– El ajuste de offset.</li> </ul>
<b>Meta</b>	Controlar del paso de vehículos que atraviesa una intersección.	

Tabla 7. Caracterización DA

<b>NOMBRE DRIVER CONTROL AGENT – DA</b>		
<b>Sensores</b>	<b>View Sensor - VS</b>	Permite observar diferentes elementos en el ambiente, categorizados en: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Elementos de Infraestructura vial. <ul style="list-style-type: none"> <li>– Percepción en los cambios de semáforo.</li> <li>– Percepción de las señales, esto incluye: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Sentido.</li> <li>– Restricciones de velocidad.</li> <li>– Restricciones de cambio de carril.</li> <li>– Luces de parqueo.</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>– Percepción otros vehículos. <ul style="list-style-type: none"> <li>– Percepción Señales de Cambio de Línea.</li> <li>– Percepción de Distancia (frontal, lateral y trasera).</li> </ul> </li> </ul>
<b>Actuadores</b>	<b>Motion Actuator - MA</b>	Actuadores relacionados al control de movimiento. Entre ellos se encuentran: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Pedal para el cambio de velocidad en un automóvil.</li> <li>– Pedal para disminuir la velocidad de un automóvil.</li> <li>– Volante para cambiar la dirección de un automóvil.</li> </ul>
	<b>Signal Actuator – SA</b>	Actuadores relacionados a la emisión de señales al exterior. Entre ellos se encuentran: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Señal de luz para anunciar si un automóvil realizará un cambio de carril.</li> <li>– Señal de luz anunciar si un automóvil está parando.</li> </ul>
<b>Meta</b>	Ir de un origen a un destino en el menor tiempo posible.	

Tabla 8. Caracterización TAMA

NOMBRE		TRAFFIC AREA MONITOR AGENT – TAMA
Actuadores	Storage Actuator – SA	Permite almacenar la información de tráfico de una determinada área geográfica en sistemas persistentes. El área geográfica puede darse en tres niveles así: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Nivel I: Información de una agrupación de intersecciones (y por lo tanto de un grupo de carreteras.</li> <li>– Nivel II: Información de una intersección o una línea.</li> <li>– Nivel III: Información de un objeto específico (semáforo, señal, sensor).</li> </ul>
Meta	Entregar información de una determinada área de tráfico.	

Tabla 9. Caracterización TSUA

NOMBRE		TRAFFIC SUPERVISOR AGENT – TSUA
Sensores	Input Periferal Sensor – IPS	Periféricos de entrada que permiten obtener las instrucciones de un controlador humano.
Actuadores	Output Periferical Actuator	Periféricos de salida que permiten procesar y visualizar la información enviada por los TAMA.
Meta	Supervisar, soportar y controlar las decisiones de los controladores humanos.	

#### 4.4 Interacciones entre Agentes

En la Figura 4 se ilustran las interacciones entre los agentes del modelo propuesto MITC. Así mismo, en la Tabla 10 se describen detalladamente dichas interacciones en términos de sus datos asociados.

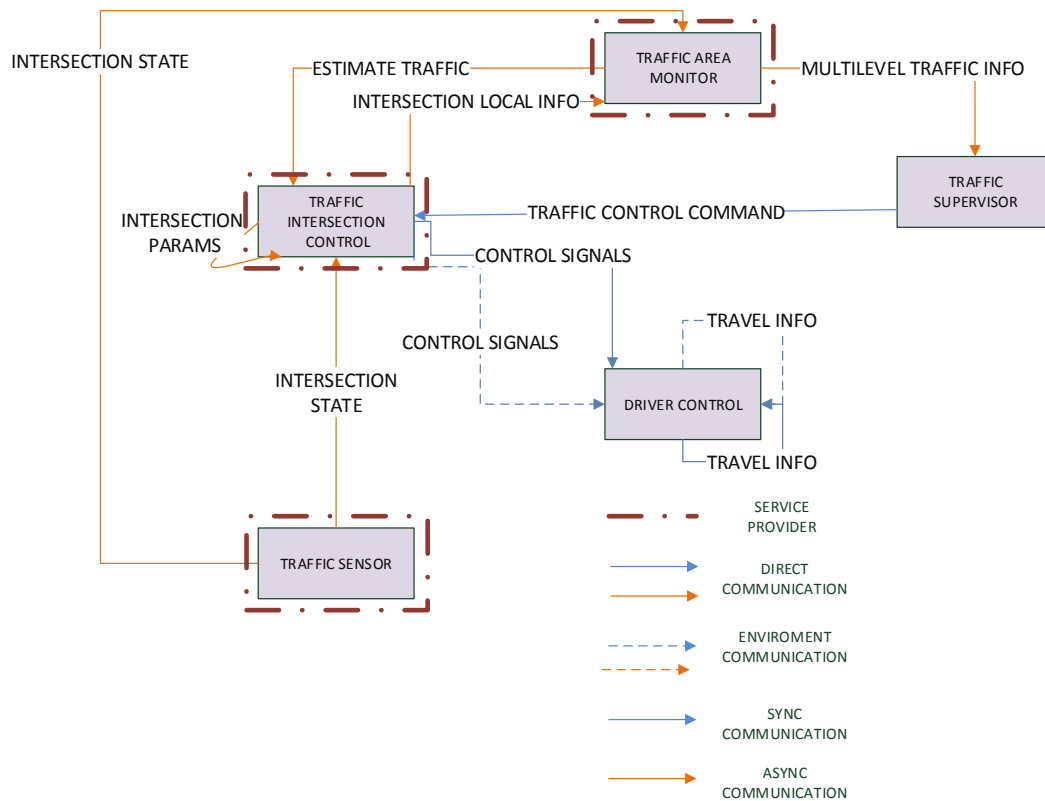


Figura 4. Interacciones entre agentes del modelo MITC

Tabla 10. Descripción de Interacciones

ID	NOMBRE	DATOS	DESCRIPCIÓN
IN.1	INTERSECTION STATE	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Velocidad promedio autos que pasan por el sensor.</li> <li>– El tiempo de retardo promedio de los autos que pasan por el sensor.</li> <li>– El volumen de autos para un periodo de tiempo t que pasan por el sensor.</li> <li>– Volumen de peatones en una intersección</li> </ul>	Información de estado de la intersección.
IN.2	INTERSECTION PARAMS	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Parámetros Control: Tiempo de ciclo, fase y <i>offset</i>.</li> </ul>	Envía la información y los parámetros de control a los vecinos.



		<ul style="list-style-type: none"> <li>– Estado: Velocidad promedio automóviles, control de retardo y volumen de autos.</li> </ul>	
IN.3	INTERSECTION LOCAL INFO	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Velocidad promedio automóviles.</li> <li>– Control de retardo automóviles.</li> <li>– Volumen de autos</li> </ul>	Información local de tráfico de la intersección.
IN.4	ESTIMATE TRAFFIC	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Volumen estimado de automóviles.</li> <li>– Volumen estimado de peatones.</li> </ul>	Información estimada de tráfico (puede ser estimado por histórico, por sensores <i>etc.</i> ).
IN.5	MULTILEVEL TRAFFIC INFO	<ul style="list-style-type: none"> <li>– El volumen de tráfico y peatones en la intersección.</li> <li>– El volumen de tráfico en una vía.</li> <li>– Los parámetros de control de una intersección.</li> <li>– Los parámetros de control de una vía.</li> </ul>	Información relevante al supervisor. Esta información puede darse en diferentes niveles de abstracción.
IN.6	TRAFFIC CONTROL COMMAND	<p>Dos clases de información:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Datos de control, asociados a los parámetros.</li> <li>– Datos de Sincronización</li> </ul>	Comandos específicos relacionados a los parámetros de control de la intersección.
IN.7	TRAVEL INFO	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Velocidad.</li> <li>– Cambio de Carril.</li> </ul>	Información de viaje de un driver.
IN.8	CONTROL SIGNALS	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cambio de una señal (cambio de luz, aviso de regla <i>etc.</i>).</li> </ul>	Información de las señales de control. Puede ser síncrona si es transmitida a través del ambiente, o asíncrona si es transmitida por medios no convencionales.

De acuerdo a las interacciones entre los agentes, existen diferentes mecanismos de comunicación a saber:

1. Service Provider (Proveedor de Servicio): se refiere a un agente que proporciona un mismo tipo de información a diferentes agentes. Dicha información puede suministrarse de dos formas:
  - a. Los agentes pueden suscribirse al Proveedor del Servicio y recibir la información de forma asíncrona (Async Communication), cuando esté disponible.

- b. Los agentes realizan peticiones para obtener la información de forma síncrona (Sync Communication).
2. Direct Communication: comunicación directa y explícita, comúnmente a través de mecanismos como cambio de luces, u otros no convencionales como redes inalámbricas.
3. Environment Communication: comunicación indirecta a través del ambiente. Por ejemplo una bocina o una luz direccional.

#### **4.5 Agentes de Tráfico y Comunicación**

La comunicación entre agentes de tráfico por medios implícitos (ej. un cambio de luz, o una bocina) no garantiza la mejoría de los índices rendimiento, ya que su utilización se restringe a acciones reactivas ante un evento sucedido (por ej. una colisión). De acuerdo a lo anterior, la necesidad de utilizar mecanismos no convencionales de comunicación (por ej. a través de una red inalámbrica) toma importante relevancia, pues permite a los agentes de tráfico implementar nuevos mecanismos de interacción (basados en anticipación, pro-actividad *etc.*) para mejorar los procesos de toma de decisiones. En el siguiente capítulo, se describe un modelo de comunicación no convencional cuyas intenciones de los agentes son expresadas explícitamente, para mejorar los escenarios de conflictos de tráfico.

## 5. MODELO COOPERATIVO

En este capítulo se describe el protocolo de resolución de conflictos de modelo propuesto MITC. Inicialmente, se define el concepto y la categorización de las intenciones utilizadas en este modelo. A continuación, se describen las intenciones para cada uno de los agentes de tráfico. Finalmente, se realiza la caracterización de los conflictos de tráfico junto protocolo de resolución propuesto.

### 5.1 Definición de Intención

En este trabajo se define una intención como las metas que puede tener un agente de tráfico. Dichas metas pueden clasificarse de forma jerárquica y recursiva<sup>3</sup> así:

1. Intenciones de Propósito Global: corresponde a la meta global del agente.
2. Intenciones Derivadas por Plan: son aquellas intenciones sujetas a las *predisposiciones* de los agente. Por ejemplo:
  - a. Un conductor de acuerdo a su conocimiento del tráfico y a la información exógena (noticias, estado del tiempo *etc.*), selecciona la ruta para ir de su origen a su destino.
  - b. El plan de control de un semáforo basado en datos históricos.
3. Intenciones Inmediatas: son aquellas *acciones* tomadas en *tiempo real* de acuerdo a las condiciones de tráfico. Estas intenciones son motivadas por el ambiente, por ejemplo un accidente de tráfico o un bloqueo por condiciones climáticas adversas.

De acuerdo a lo anterior, considérese un Sistema Multiagente con  $N$  agentes y  $1 \leq n \leq N$ .

- Para todo agente  $a_n$  existe una Intención Global  $G_n$ .
- $G_n$  es un conjunto de Intenciones Derivadas por Plan  $\{P_{n1}, P_{n2}, P_{n3} \dots P_{nP}\}$  de tamaño  $P$  y  $1 \leq p \leq P$ .
- $P_p$  es un conjunto de Intenciones Inmediatas  $\{I_{n1}, I_{n2} \dots I_{nT}\}$  de tamaño  $T$  y  $1 \leq t \leq T$ .

#### 5.1.1 Intenciones por Agente de Tráfico

En la Tabla 11, se definen cada una de las intenciones para los agentes de tráfico del modelo MITC de acuerdo a la estructura jerárquica descrita anteriormente.

---

<sup>3</sup> La recursividad se refiere al hecho en el cual las intenciones de nivel superior están definidas por todas las intenciones de sus niveles inferiores. Por ejemplo, una intención global está definida por un conjunto de intenciones derivadas por plan.

Tabla 11. Caracterización Intenciones y Agentes

AGENTE	INTENCIONES DE PROPÓSITO GLOBAL	INTENCIONES DERIVADAS POR PLAN	INTENCIONES INMEDIATAS	CAMBIOS EN EL AGENTE
Traffic Sensor Agent – TSA	Obtener información de tráfico y generar medidas que puedan determinar su desempeño.			
Traffic Intersection Agent- TIA	Disminuir los tiempos de retardo de los automóviles.	Ajustes de parámetros de control por adquisición histórica.	Cambio de luz.	Ciclo. Fase. Offset.
Driver Control Agent – DA	Ir de un punto <i>A</i> a un punto <i>B</i> en el menor tiempo posible.	Selección de ruta de viaje.	Girar a la derecha o a la izquierda	Acción de Movimiento.
			Continuar hacia adelante	
			Frenar	
			Acelerar	
			Cambiar de línea	
Traffic Area Monitor Agent – TAMA	Entregar información multinivel de una determinada área de tráfico.			
Traffic Supervisor Agent	Soportar las decisiones de los controladores humanos.	Establecer regla control por periodo.		Acción de Control.

## 5.2 Descripción de los Vínculos Cooperativos Intencionales

Debido a la transmisión explícita de las intenciones, surgen nuevas interacciones que permiten a los agentes de tráfico cooperar para poder resolver los conflictos. En la Figura 5 se ilustran los vínculos de cooperación descritos en la Tabla 12. Nótese que este trabajo se enfoca en la comunicación las intenciones inmediatas  $It_n$  para un agente  $a_n$ .

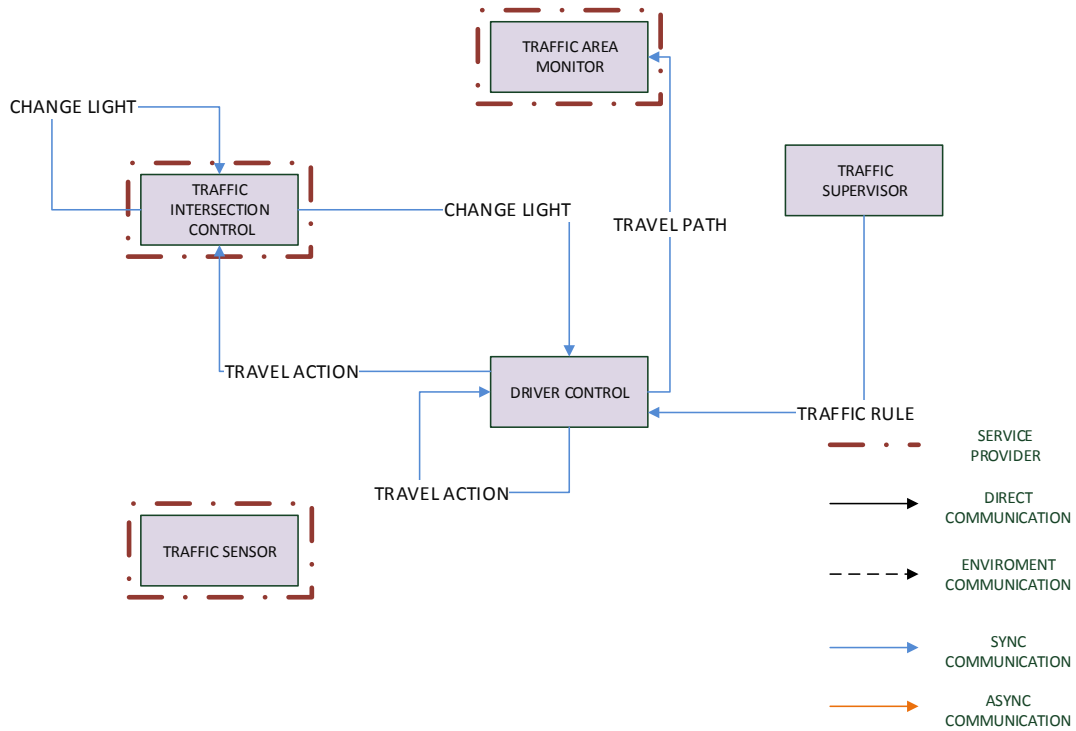


Figura 5. Vínculos Cooperativos Intencionales

Los mecanismos de comunicación para los vínculos cooperativos intencionales son los explicados en el apartado anterior.

Tabla 12. Descripción Vínculos Cooperativos Intencionales

ID VINCULO COOPERATIVO	AGENTES INTERVINIENTES	NOMBRE DE LA INTERACCIÓN	DESCRIPCIÓN
<b>C1</b>	TRAFFIC INTERSECTION CONTROL – TRAFFIC INTERSECTION CONTROL	CHANGE LIGHT	Intención de cambio de luz.
<b>C3</b>	DRIVER CONTROL – DRIVER CONTROL	TRAVEL ACTION	Intención de acción de viaje (ej. Un cambio de línea)
<b>C4</b>	TRAFFIC INTERSECTION	– CHANGE LIGHT	– Intención de cambio de luz.

	CONTROL – DRIVER CONTROL	– TRAVEL ACTION	– Intención de acción de viaje (ej. Voltar en una intersección).
C5	DRIVER CONTROL - TRAFFIC SUPERVISOR	TRAFFIC RULE	Intención Regla de Tráfico (e. Cambio de sentido en un vía).

### 5.2.1 Descripción General del Protocolo de Resolución de Conflictos

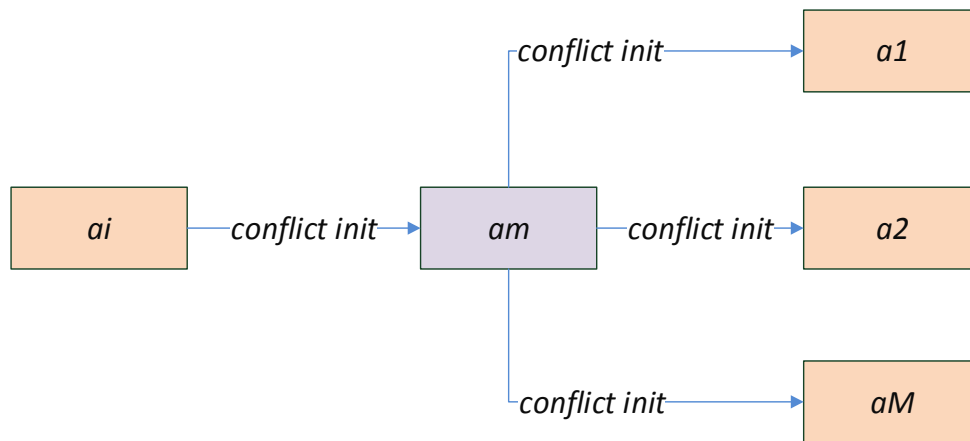
Como se mencionó anteriormente, los conflictos de tráfico están enmarcados por la escasez de la infraestructura vial y las metas antagónicas entre sus agentes. Dichos conflictos suceden en área geográfica definida (ej. Una intersección) y tienen una duración limitada en el tiempo. De acuerdo a lo anterior, para resolver los conflictos el modelo MITC propone lo siguiente:

1. Un conflicto tiene asociado un ámbito  $CS$  denominado *conflict set*. El ámbito se refiere al conjunto de agentes que intervienen conflicto, esto es  $CS = \{a_1, a_2, a_3 \dots a_M\}$  con  $1 \leq k \leq M$ .
2. Todo agente  $a_k$  tiene un crédito  $c_k$ . El crédito representa el beneficio que recibe un agente cuando un conflicto es resuelto a su favor.
3. Considérese un agente iniciador del conflicto  $a_i$  que comunica una intención inmediata  $I_{it}$  del conjunto de intenciones inmediatas disponibles, esto es  $I_{it} \in \{I_{i1}, I_{i2}, I_{i3} \dots I_{iT}\}$  con  $0 < t \leq T$  y  $a_i \in CS$ .
4. Para todo agente  $a_i$  existe una función de posibilidad  $f_{pos}(I_{it})$  que dada la intención  $I_{it}$ , evalúa la posibilidad de causar un conflicto. La función  $f_{pos}$  cumple con las siguientes características:
  - Está definida en el intervalo  $[0,1]$ . Valores cercanos al 1 presentan una mayor posibilidad de que la intención cause un conflicto.
  - Si el valor de la función  $f_{pos}$  supera un umbral  $U$  se inicia el dialogo para prevenir el conflicto.
5. Un *conflicto set*  $CS$  tiene asociado un agente  $a_m$  que permite mediar en el conflicto, donde  $a_m \in CS$ .
6. Cada agente  $a_k$  genera un valor de oferta (*bid*)  $b_k$ , dada la intención  $I_{kt}$ . Existe una función  $f_{bid}$  tal que  $f_{bid}(I_{kt}) = b_k$
7. Para cada agente  $a_k$  existe un valor de utilidad  $u_k$  como resultado en la resolución del conflicto.
8. Todo conflicto tiene un identificador único  $t_m$ . Todo mensaje perteneciente al dialogo de resolución del conflicto tiene asociado dicho identificador.

### 5.2.2 Protocolo de Resolución de Conflictos.

A continuación se describe el dialogo cooperativo para cualquier escenario entre los agentes de tráfico.

1. Si para un agente  $a_i$  su función de posibilidad  $f_{pos}(I_{it})$  supera un umbral  $U^4$  crea un agente de mediación  $a_m$ . El agente iniciador envía un mensaje *conflict init* al agente mediador, adjuntando la intención  $I_{it}$ , la oferta  $b_i$ , el crédito acumulado  $c_i$  y los agentes dentro del *conflict set CS*.
2. Como se ilustra en la Figura 6, el agente mediador  $a_m$  reenvía el mensaje *conflict init* a todos los agentes  $a_k$  (con  $k \neq i$  y  $k \neq m$ ) dentro del *conflict set CS*.

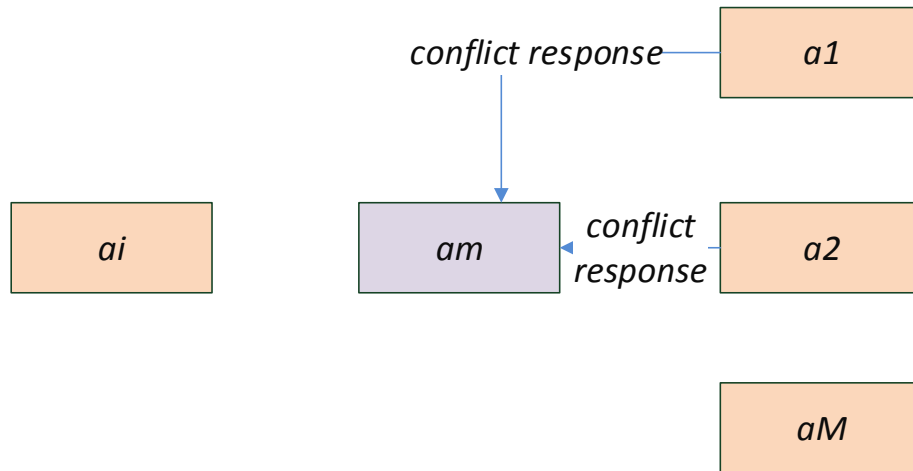


**Figura 6. Protocolo Resolución de Conflictos, Etapa I**

3. En la Etapa II (ver Figura 7) los agentes  $a_k$  reciben la petición de iniciación del diálogo de resolución de conflictos y contestan con un mensaje *conflict response*, incluyendo el crédito acumulado  $c_k$ , y la oferta  $b_k$ . Nótese que algunos agentes pueden no responder a la petición de Resolución de Conflicto por errores inherentes a la comunicación.

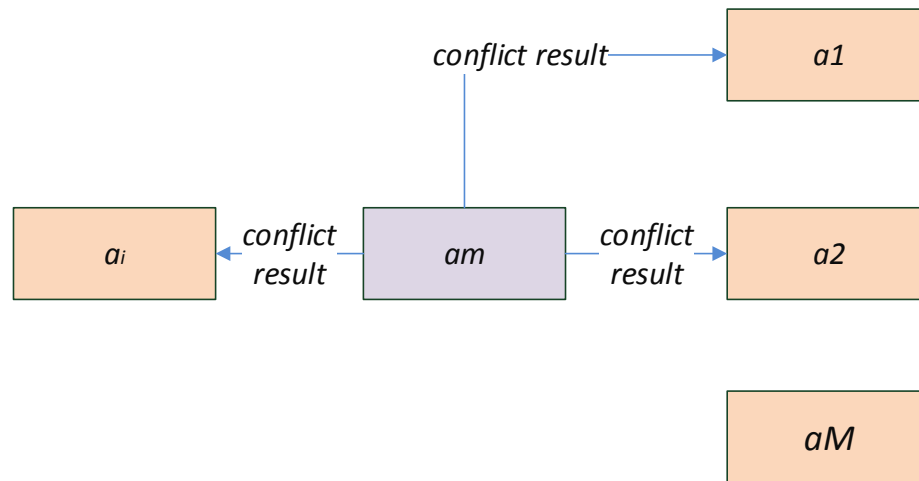
---

<sup>4</sup> La función de posibilidad y su umbral es definida por el diseñador del sistema dependiendo del contexto (áreas urbanas densificadas, rurales, autopistas interestatales etc.).



**Figura 7. Protocolo Resolución Conflictos, Etapa II**

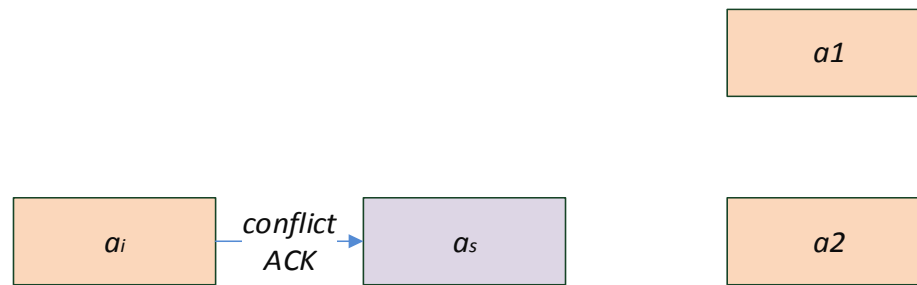
4. En la Etapa III el agente mediador  $a_m$  calcula las utilidad  $u_k$  para el agente  $a_i$  y cada agente  $a_k$ . Así mismo,  $a_m$  envía el mensaje *conflict result* anunciando la utilidad  $u_i$  al agente  $a_i$  y la utilidad  $u_k$  para cada agente  $a_k$ .



**Figura 8. Protocolo Resolución Conflictos, Etapa III**

5. Finalmente, en la Etapa IV el agente iniciador envía el mensaje *conflict ACK* confirmando la ejecución de la intención (ver Figura 9).





**Figura 9. Protocolo Resolución Conflictos, Etapa IV**

En este sentido, ya que un agente puede verse involucrado en diferentes conflictos simultáneamente, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones de concurrencia:

- Cuando un agente  $a_i$  inicia un diálogo de conflicto, o un agente  $a_k$  recibe una petición de resolución, bloquea su *disponibilidad* de participar en cualquier otro dialogo de resolución. Esto garantiza que un agente solo participa en un dialogo de resolución de conflictos a la vez.
- La participación de un conflicto de un agente  $a_i$  es temporal y delimitada en el tiempo. Cuando el tiempo expira, el agente activa su *disponibilidad* de participar en cualquier otro dialogo de resolución.
- Para todo agente  $a_i, a_k \in CS$  existen dos colas de manejo de mensajes:
  - Una cola de mensajes entrantes  $Q_{in}$  que almacena los mensajes iniciales de resolución. Cada mensaje recibido por el agente, es almacenado en la cola utilizando como identificador  $t_m$ .
  - Una cola para manejar los eventos de un respectivo conflicto  $Q_{man}$ . Esta cola manejará los mensajes para un solo conflicto de forma simultánea.
- Cuando se finaliza el dialogo de conflicto, los agentes activan su *disponibilidad* de participar en cualquier otro dialogo de resolución.

### 5.3 Resolución de Conflictos y Benevolencia

El protocolo de resolución de conflictos descrito anteriormente, permite a los agentes resolver dichos conflictos a partir del concepto de crédito para favorecer su benevolencia. Intuitivamente, un agente de tráfico es benevolente cuando *sacrifica* su propio beneficio en pro del beneficio global. En este sentido, los agentes reciben una utilidad positiva cuando el conflicto *no* es resuelto a su favor, sumando a su crédito y favoreciendo su benevolencia.

## 6. MODELO TOMA DE DECISIONES

En este capítulo se describe el modelo de toma de decisiones para los agentes de tráfico. Inicialmente, se caracterizan los conflictos de tráfico como un modelo de teoría juegos. A continuación, se realiza la formalización del juego para un conflicto de tráfico. Finalmente, se describen los pasos para la solución del conflicto en términos del planteamiento de un juego en forma normal.

La teoría de juegos estudia la forma en que un individuo toma decisiones, cuando ésta depende de las decisiones de los otros individuos [43]. Uno de los aspectos más importantes de esta disciplina, es cómo los agentes toman sus decisiones en un contexto egoísta; es decir, donde cada individuo se preocupa por alcanzar el estado del mundo que realmente le gusta. En este sentido, uno de los enfoques más interesantes es el del Equilibrio de Nash, cuyo objetivo es encontrar un estado del mundo en el que ningún agente está dispuesto a cambiar su decisión unilateralmente, ya que esto empeoraría su situación [43].

### 6.1 Suposiciones Generales de un Conflicto de Tráfico como un Modelo de Teoría de Juego

MITC propone un modelo basado teoría de juegos para encontrar los valores de utilidad  $u_k$  para los agentes  $a_k$  que se involucran en un *conflict set*  $CS$  tal que  $CS = \{a_1, a_2, a_3 \dots a_M\}$  y  $1 \leq k \leq M$ . Los conflictos de tráfico pueden describirse como un modelo de teoría de juegos, de acuerdo a lo siguientes consideraciones:

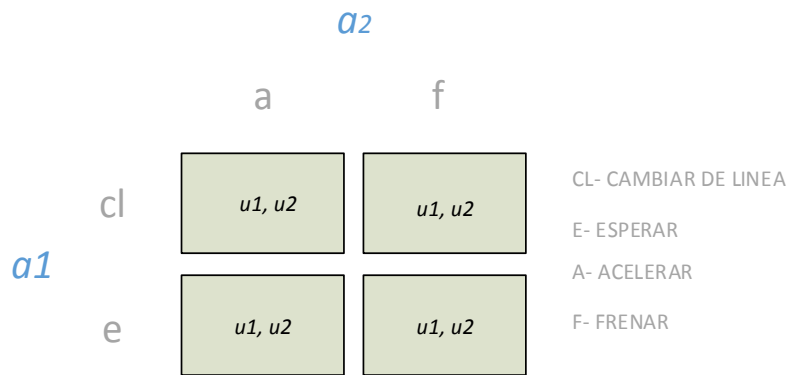
1. Son juegos de información completa (los jugadores conocen *completamente* las estrategias de los otros, pues comunican sus intenciones) y perfecta (no hay incertidumbre acerca de las decisiones de los agentes).
2. Son juegos de interacción simultánea, es decir que cada conflicto es independiente de eventos anteriores que ocurren con los agentes.
3. Jugadores: Todos los agentes de tráfico  $a_k \in CS$
4. Acciones: De un agente  $a_k$  corresponde al vector  $IC_k = \{I_{kt}, \overline{I_{kt}}\}$  donde  $I_{kt}$  corresponde a la intención inmediata del agente y  $\overline{I_{kt}}$  corresponde a no realizar dicha intención. Nótese que en este capítulo se refiere a los términos acción e intención inmediata de forma indistinta.
5. Valor de utilidad: Corresponde al valor de la utilidad  $u_k$  obtenida por el agente  $a_k$ .

### 6.2 Formalización de un Conflicto de Tráfico como un Juego en Forma Normal

Un conflicto de tráfico se puede caracterizar como un juego en Forma Normal, como una tupla  $(CS, IC, u)$  donde:

1.  $CS$  (*conflict set*) es el conjunto finito de agentes  $a_k$  que participan en el juego<sup>5</sup>.
2.  $IC = \{IC_1, IC_2, IC_3 \dots IC_M\}$  es un vector tal que  $IC_{kt} = \{I_{kt}, \overline{I_{kt}}\}$ , con  $0 < k \leq M$ .  $IC_{kt}$  corresponde conjunto de acciones disponibles para el agente  $a_k$  y se denomina *perfil de acción* para el agente  $a_k$ .
3.  $u = u_1, u_2 \dots \dots \dots u_M$ , donde la utilidad  $u_k$  está definida en términos del crédito acumulado  $c_k$  y del valor de oferta  $b_k$ .

Otra forma de representación más intuitiva de un juego en forma normal es el mecanismo de bimatriz. En la bimatriz, las celdas contienen la utilidad de cada agente para las posibles combinaciones de las estrategias. Cada celda contiene dos números (y de ahí el origen de su nombre), que representa la utilidad de los agentes en dicha estrategia. En la Figura 10 se ilustra la bimatriz para un conflicto de cambio de línea entre dos agentes vehículos (DA – Driver Agents)  $a_1$  y  $a_2$ .



**Figura 10. Bimatriz Conflicto Tráfico**

Por lo tanto, en términos generales para un conflicto de tráfico con  $M$  agentes, las acciones  $I_{1t}^*, I_{2t}^* \dots I_{Mt}^*$  forman un **Equilibrio de Nash** si para cada agente  $a_k$ , La acción inmediata  $I_{kt}^*$  es la mejor acción del agente  $a_k$  para las acciones de los otros  $k - 1$  jugadores  $I_{1t}^*, I_{2t}^*, I_{(k-1)t}^*, I_{(k+1)t}^* \dots I_{Mt}^*$ . Esto es:

$$u(I_{1t}^*, I_{2t}^*, I_{(k-1)t}^*, I_{kt}^*, I_{(k+1)t}^* \dots I_{Mt}^*) > u(I_{1t}^*, I_{2t}^*, I_{(k-1)t}^*, I_{kt}, I_{(k+1)t}^* \dots I_{Mt}^*)$$

Para cada posible acción  $I_{kt}$  en  $IC_{kt}$ ,  $I_{kt}$  es una solución de:

$$\max(I_{1t}^*, I_{2t}^*, I_{(k-1)t}^*, I_{kt}, I_{(k+1)t}^* \dots I_{Mt}^*)$$

<sup>5</sup> Para mayor información sobre el *conflict set* ver la sección 5.2.2 Protocolo de Resolución de Conflictos.

### 6.3 Estrategia para el Cálculo del Equilibrio de Nash

Durante el paso 3 y 4 del protocolo de negociación, el agente mediador recibe las ofertas de los agentes en el *conflict set* y debe resolver el conflicto calculando el equilibrio de Nash correspondiente. La estrategia para hacerlo dada una intención inmediata es la siguiente:

1. Se obtienen las ofertas  $b_1, b_2, b_3, b_4 \dots b_M$ . La función de oferta  $f_{bid}(I_{kt}) = b_k$  para un agente  $a_k$  sigue los siguientes criterios:
  - a. Cada intención  $I_{kt}$  tiene asociado un valor base de oferta  $w_{kt}$  con  $w_{kt} \in Z$ . El valor base de oferta puede verse como la importancia de la intención en el contexto del sistema (ej. una ambulancia puede tener mayor importancia en sus intenciones que los automóviles particulares).
  - b. Cada agente  $a_k$  tiene un coeficiente de benevolencia  $v_k$  con  $v_k \in Z$ . Para mayor información sobre la benevolencia ver la sección 5.3 Resolución de Conflictos y Benevolencia.
  - c. Cada oferta está atenuada por el crédito acumulado  $c_k$ . A mayor valor de crédito acumulado, menor es el valor de oferta  $b_k$ . Esto permite controlar a aquellos agentes que abusan de su benevolencia para acumular crédito.

De acuerdo lo anterior, la función de oferta es la siguiente:

$$b_k = f_{bid}(I_{kt}) = (w_{kt} * v_k) \left( \frac{1}{c_k} \right) \text{ para } c_k > 0$$

2. El agente mediador  $a_m$  calcula las bi-matriz de juegos  $T_{ik}$  para todo par de agentes  $a_i$  (agente iniciador) y  $a_k$  con  $i \neq k$ . El cálculo de las utilidades para la bi-matriz se basa en las siguientes condiciones:

Si la intención  $I_{il}$  es elegida y  $I_{kl}$  no, entonces  $u_i = b_i - b_k, u_k = b_k + b_i$

Si la intención  $I_{kl}$  es elegida y  $I_{il}$  no entonces  $u_k = b_k - b_i, u_i = b_i + b_k$

Si  $I_{il}$  y  $I_{kl}$  son elegidas entonces  $u_i = -b_i$  y  $u_k = -b_k$

Si  $I_{il}$  y  $I_{kl}$  no son elegidas entonces  $u_i = 0$  y  $u_k = 0$

La representación gráfica del cálculo de la bi-matriz puede verse en la Figura 11.

		$a_1$			
		$-b_1, -b_1$	$b_1 - b_1, b_1 + b_1$		
$a_i$		$b_1 + b_1, b_1 - b_1$	$0,0$	$T_{i1}$	
		$a_2$			
		$-b_1, -b_2$	$b_1 - b_2, b_2 + b_1$		
$a_i$		$b_1 + b_2, b_2 - b_1$	$0,0$	$T_{i2}$	
		$a_m$			
		$-b_1, -b_m$	$b_1 - b_m, b_m + b_1$		
$a_i$		$b_1 + b_m, b_m - b_1$	$0,0$	$T_{im}$	

**Figura 11. Cálculo de la matriz de juegos**

3. Para cada matriz  $T_{ik}$  se calcula el equilibrio de Nash  $Eq_{ik}$  correspondiente. Nótese que el equilibrio puede computarse por diferentes algoritmos como el de Lemke–Howson (corresponde al algoritmo más común y el utilizado en la implementación del modelo) [43].

4. Se obtienen todos los equilibrios  $Eq_{ik}$  donde la intención  $I_{it}$  del agente iniciador  $a_i$  sea seleccionado. Luego, se selecciona el equilibrio  $Eq_{ik}$  donde la utilidad  $u_i$  sea la máxima.
5. Los agentes  $a_i$  y  $a_k$  modifican su crédito acumulado de acuerdo a lo siguiente:

$$c_i = c_i + u_i \text{ y } c_k = c_k + u_k$$

El cálculo del equilibrio de Nash incluye ciertas características a tener en cuenta:

- Pueden existir ocasiones en las cuales no se encuentre ningún equilibrio, en tal caso no existe resolución del conflicto.
- El estado para  $u_i = -b_i$  y  $u_k = -b_k$  nunca puede corresponder a un equilibrio, es decir, se omite el estado en que ambos agentes cumplan su intención al mismo tiempo.

#### 6.4 Conclusiones del Cálculo del Modelo de Teoría de Juegos

La resolución de un conflicto de tráfico como un equilibrio de Nash garantiza un mecanismo razonable para agentes de tráfico egoístas. Sin embargo, la inclusión de la benevolencia en la función de utilidad ataca uno de los problemas principales del tráfico urbano, referido esencialmente a la ausencia de conciencia pública. Por otra parte, MITC evita el cálculo de una única bimatrix para los  $M$  agentes por el costo y complejidad computacional que ello conlleva.

## 7. ARQUITECTURA DE IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo se describe la arquitectura de implementación del modelo propuesto. Inicialmente, se describe la arquitectura del simulador MovSim [44] y luego los componentes de extensión utilizados para la implementación del modelo. Finalmente, se describe el modelo de ejecución de MITC y el mecanismo de concurrencia

Para la implementación se utilizó el simulador MovSim. MovSim es un simulador microscópico que implementa diferentes modelos de cambio de línea, entre los que se encuentran los modelos de tiempo continuo y de autómatas celulares. Así mismo, MovSim permite simular diferentes escenarios de tráfico, incluyendo el paso por intersecciones, cambios de línea, cambios de velocidad *etc.* A diferencia de otros simuladores, MovSim está escrito bajo lenguaje Java y es completamente extensible, pues su código fuente está disponible en línea bajo licencia GPL [45].

### 7.1 Arquitectura de MovSim

MovSim está compuesto de cuatro módulos principales tal como se ilustra en el siguiente diagrama de componentes (ver Figura 12).

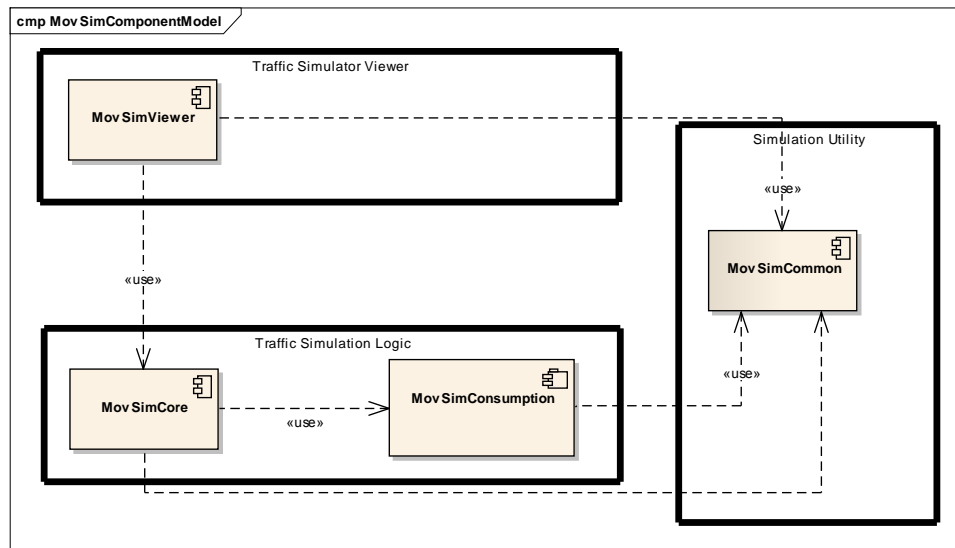


Figura 12. Arquitectura de Componentes de MovSim

1. MovSimCommon: es un componente transversal a los demás componentes de MovSim. Contiene clases comunes para realizar *login* e instrumentación, el cálculo de funciones de probabilidad, *serialización* y *deserialización* XML entre otros.

2. **MovSimCore:** es el núcleo de la simulación de tráfico en MovSim. Sus responsabilidades son amplias y diversas, entre las funciones principales se encuentran:
  - Estructuración de la Red de Tráfico. La estructuración de la red se realiza a través del estándar OpenDrive, un estándar XML agnóstico a la plataforma para diseñar simulaciones de tráfico.
  - Generación y control de Señales Tráfico: MovSim ubica las señales de tráfico (semáforos, límites de velocidad *etc.*) y permite establecer modelos de control cuando sea necesario.
  - Generación y control de Vehículos: MovSim permite generar vehículos de diferente tamaño y configuración, realizar el diseño de sus rutas entre otros.
3. **MovSimConsumption:** un módulo para modelar el cálculo de rendimiento energético de sus diferentes algoritmos.
4. **MovSimViewer:** es el visualizador gráfico para las simulaciones de tráfico. Está construido sobre AWT, Swing y Java 2D.

## 7.2 Componentes de Implementación de MITC

Para extender MovSIM con el Modelo Multiagente MITC se planteó el diseño estructural tal como lo muestra el diagrama de componentes de la Figura 13.

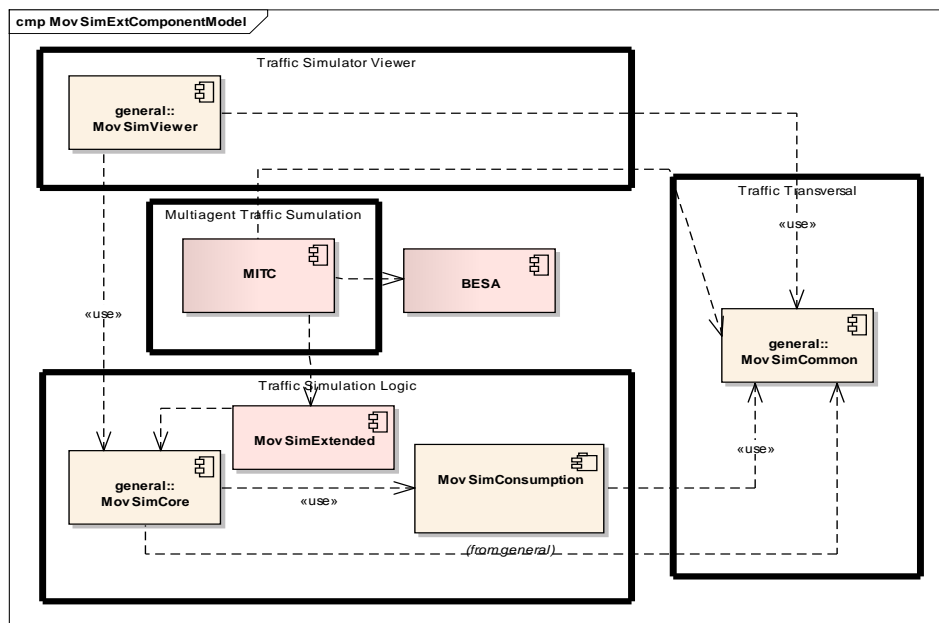


Figura 13. Arquitectura de Componentes de MITC



De acuerdo a lo anterior, se plantean tres componentes de extensión:

1. MITC: es el componente correspondiente al modelo Multiagente e Intencional de Tráfico Cooperativo.
2. MovSimExtended: corresponde a clases de extensión y de fachada que permiten exponer coherentemente los métodos del simulador.
3. BESA: Corresponde al marco para desarrollo de sistemas Multiagente construido bajo el marco del grupo de investigación SIDRe [35].

### 7.3 Diseño Estructural MITC

MITC está diseñado como conjunto de clases que conforman el modelo Multiagente. La principal característica que exhibe el Diseño Estructural (ver Figura 14), establece que cada agente tiene una clase de implementación (terminadas con el sufijo *Agent*) y una clase de comportamiento (terminadas con el sufijo *Behavior*). Un comportamiento permite a cada agente tener un hilo de ejecución, para ejecutar una tarea determinada. En las siguientes secciones, se describen el conjunto de clases de MITC en términos de vistas para facilitar su comprensión.

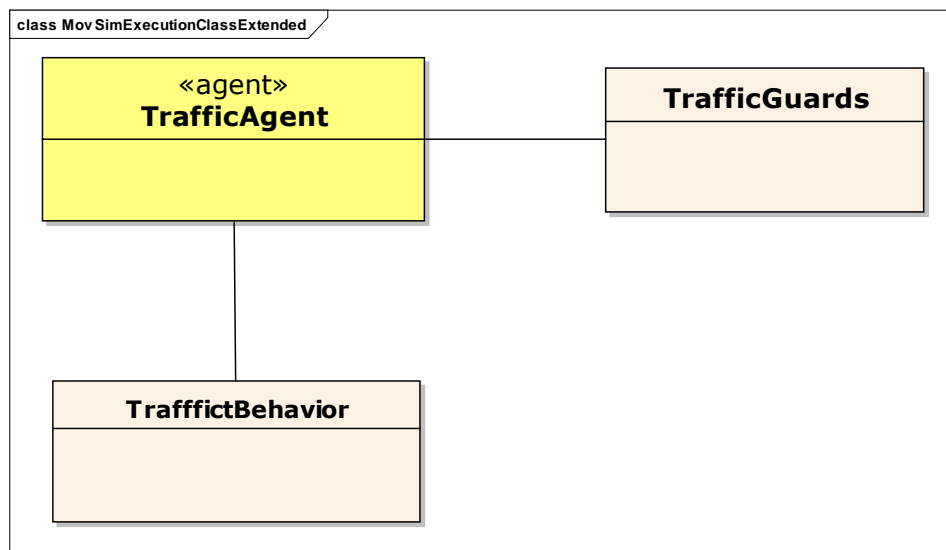


Figura 14. Estructura General de clases de MITC

#### 7.3.1 Vista de Conflicto

Esta vista se enfoca en el conjunto de clases que implementan los mecanismos de resolución de conflictos (ver Figura 15), por ejemplo las clases encapsulan los datos de un conflicto o las que resuelven el conflicto por un equilibrio de Nash.

Tabla 13. Descripción Clases Vista Conflicto

CLASE	DESCRIPCIÓN
ConflictState	Clase base para el estado de todos los agentes que potencialmente participan en un conflicto.
ConflictUtility	Clase con operaciones básicas dentro del conflicto, por ejemplo la obtención del <i>conflict set</i> , el cálculo de las funciones de utilidad, <i>etc.</i>
ConflictData	Clase base para transmitir datos entre los agentes que participan en un conflicto.
ConflictEntry	Clase utilizada para representar un conflicto en el sistema, permitiendo referenciar su identificador, los agentes en el <i>conflict set</i> y el tiempo de validez del conflicto.
ResolveConflictByGameTheory	Clase para resolver un conflicto a través del cálculo del equilibrio de Nash. Esta clase es una tarea programada, iniciada por el agente mediador en el <i>broadcast</i> , y cuyo tiempo de vida es finito.
ResendQueueConflicts-Guards	Guarda que re-envía las peticiones de conflicto, que fueron puestas en la cola por el bloqueo del agente.

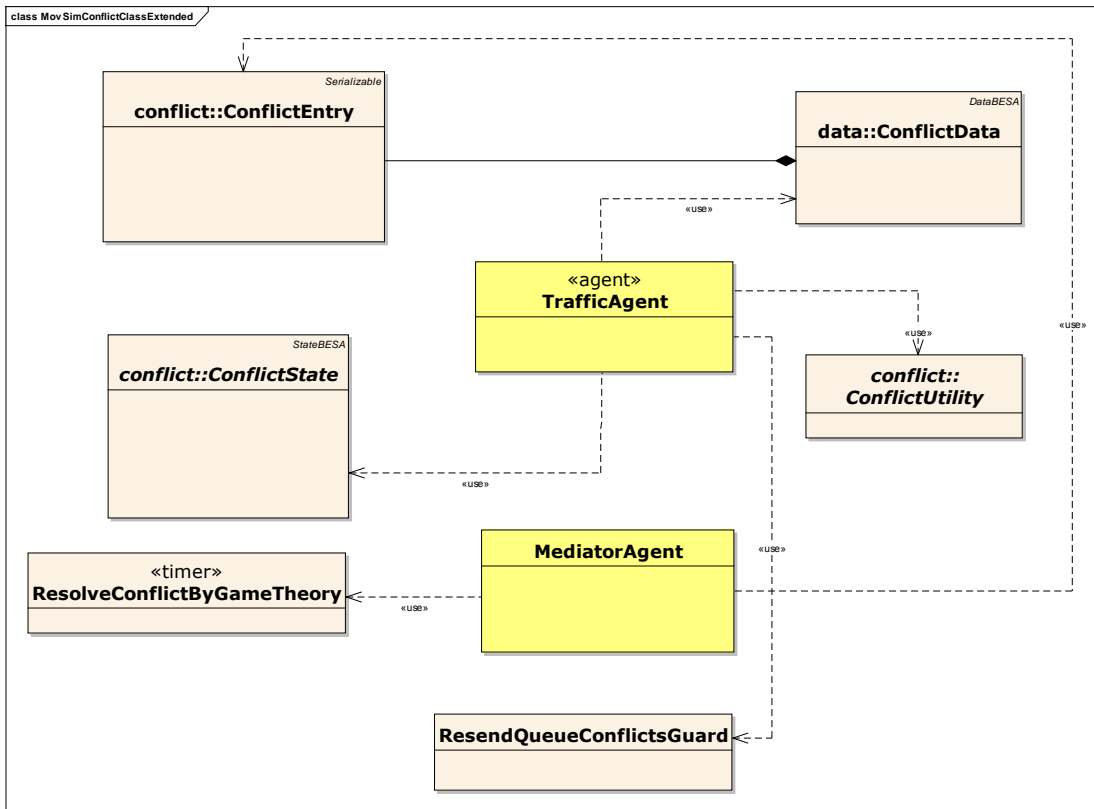


Figura 15. Vista de Conflicto

### 7.3.2 Vista de Ejecución

Esta vista se enfoca en las clases que implementan las acciones de los agentes de tráfico. Dichas acciones están representadas en términos de *guardas*, que son clases con una única función bien definida (ej. realizar un cambio de línea) y que su ejecución causa el bloqueo de su actual hilo de ejecución (el comportamiento).

Tabla 14. Descripción Clases Vista Ejecución

CLASE	DESCRIPCIÓN
DriverControlChange-LineGuard	Clase que inicia un cambio de línea para un automóvil.
DriverControlSpeedGuard	Clase para el control de velocidad de un automóvil.
DriverControlReceive-ResolutionGuard	Clase que recibe la resolución de un conflicto para un agente que representa un vehículo.
DriverControlReceive-ConflictGuard	Clase que recibe la notificación de inicio un conflicto. En esta guarda se realiza la respuesta a dicho conflicto con la oferta dada.

MediatorReceiveConflictGuard	Clase que recibe la notificación del inicio de un conflicto y realiza la propagación a todos los agentes en el <i>conflict set</i> .
MediatorResolveConflictGuard	Clase que recibe las respuestas de los agentes que fueron notificados de un conflicto.

#### 7.4 Componente de Extensión MovSIM

El componente de extensión permite al modelo Multiagente “consumir” la funcionalidad del simulador MovSim de forma no invasiva (con la menor afectación posible), utilizando el patrón fachada [45], permitiendo exponer las funcionalidades del simulador de forma coherente (ver Figura 16).

Tabla 15. Descripción Clases Extensión

CLASE	DESCRIPCIÓN
IMovSimFacade - MovSimFacade	Fachada que expone de forma coherente los servicios proporcionados por el simulador y que son consumidos por el modelo Multiagente.
SimulatorExtended	Clase que extiende el Simulator de MovSim, permitiendo crear las clases proxy, e interceptando las llamadas a creación de objetos nativos y sus referencias a los respectivos agentes.
TrafficCompositionGeneratorProxy	Clase que permite crear los agentes <i>TrafficDriverControlAgent</i> cuando los vehículos son creados. El proxy es implementado a través de CGLIB, una librería que utiliza mecanismos de reflexión (manipulación del código en tiempo de ejecución) para la intercepción de llamadas nativas.
TrafficLightsProxy	Clase que permite crear los agentes <i>TrafficIntersectionAgent</i> cuando los semáforos son creados.
TrafficControlGroupExtended	Clase de extensión de la clase <i>TrafficControlGroup</i> , que permite obtener los semáforos creados en la red de tráfico y exponerlos a través de la fachada.
VehicleExtended	Clase para extender el objeto Vehicle de MovSim, agregando características propias del modelo Multiagente.

La implementación del modelo, esta guiado por el diseño no invasivo sobre el simulador. Sin embargo, la impedancia<sup>6</sup> entre el modelo de clases de MovSim y el modelo de agentes genera

<sup>6</sup> La impedancia se refiere a la dificultad de incorporar un diseño coherente y natural entre el modelo orientado a objetos de MovSim y uno orientado a agentes.

ciertos inconvenientes en términos de las abstracciones, los mecanismos de extensión y los elementos de sincronización.

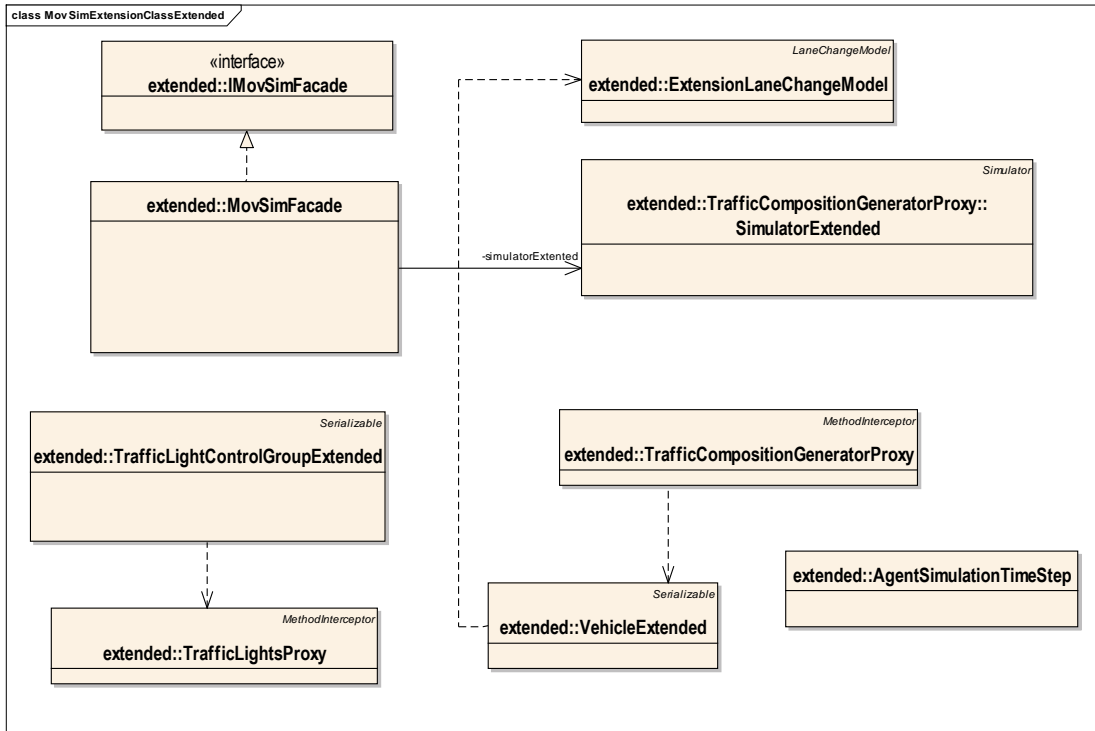


Figura 16. Clases de Extensión de MovSim

### 7.5 Modelo de Ejecución.

MovSim está basado en un modelo síncrono, en el cual cada Paso de Simulación se ejecuta secuencialmente. Un Paso de Simulación corresponde a una clase que implementa la interfaz TimeStep ejecutando un conjunto de rutinas definidas. En la Figura 17 se observan los dos principales Pasos de Simulación de MovSim:

Tabla 16. Clases del Modelo de Ejecución MovSim

CLASE	DESCRIPCIÓN
RoadNetwork	Clase encargada de realizar el movimiento de los vehículos (control de velocidad y cambio de línea) en un momento dado.
TrafficLights	Clase encargada de controlar los semáforos, lo que el cambio de fase, de ciclo y de <i>offset</i> .

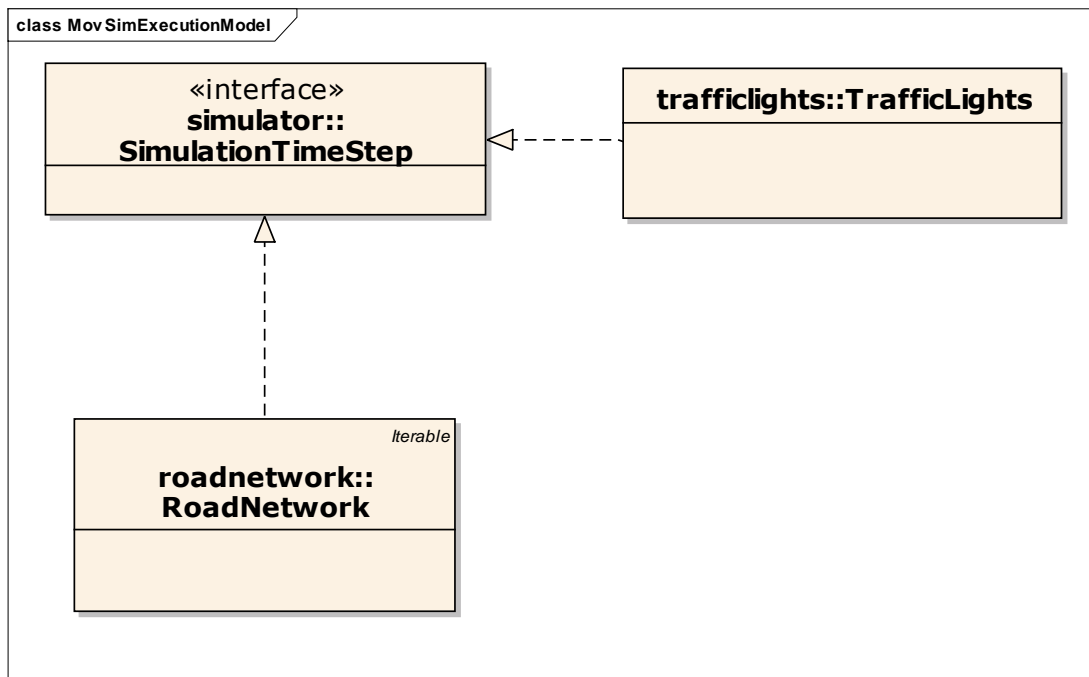


Figura 17. Pasos de Simulación de MovSim

Para poder integrar el modelo MITC, se adiciono la clase `AgentSimulationTimeStep` que permite interceptar el ciclo de instrucciones del simulador, y realizar las llamadas al ciclo de ejecución del modelo Multiagente (ver Figura 18). Debido a los mecanismos multi-hilo inherentes al framework BESA, se implementaron las siguientes características de concurrencia:

1. Identificación de los objetos compartidos entre el Simulador y MITC.
2. Sincronizar (a través del uso de bloques `synchronized`) el acceso a los objetos compartidos (En especial el listado de objetos `Vehicle` en un segmento de vía).

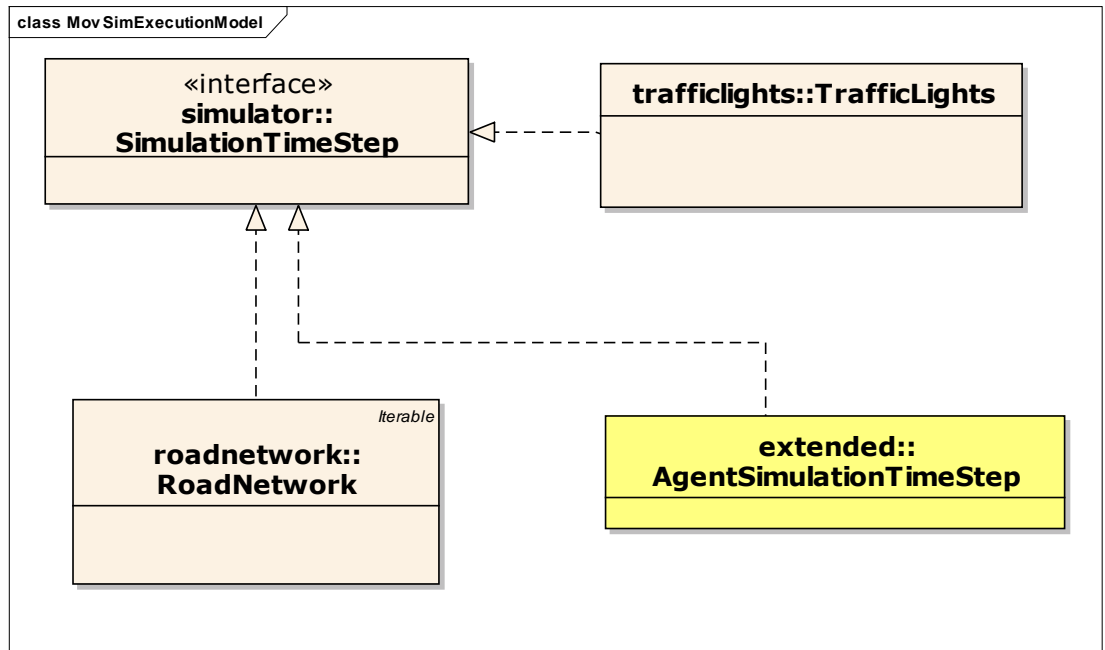


Figura 18. Extensión de los Pasos de Simulación

## 8. VALIDACIÓN

En este capítulo se describen los experimentos realizados para validar el modelo propuesto MITC. Inicialmente, se presenta el diseño del escenario de simulación en MovSim. Luego, se describen las variables dependientes, independientes e intervinientes asociadas de los experimentos. Finalmente, se presenta los resultados de los experimentos realizados.

Los experimentos tienen como propósito demostrar que el modelo MITC puede reducir el número de conflictos entre los agentes de tráfico en pro de mejorar dos aspectos principales: 1.) Los tiempos de desplazamiento y 2.) El consumo energético.

### 8.1 Diseño de Escenarios de Simulación

MovSim utiliza la especificación OpenDrive [47] para la construcción de escenarios de simulación. OpenDrive define un formato basado en el lenguaje XML (ver Figura 19), donde es posible especificar diferentes elementos de una red de tráfico<sup>7</sup>, entre los principales se encuentran:

- Las vías (*roads*) y su geometría.
- Los carriles (*lines*) que componen una vía.
- Las uniones y/o vínculos entre las vías.
- Los semáforos y las señales de tráfico.

```

<road name="R1" length="800.0" id="1" junction="-1">
  <link>
    <successor elementType="road" elementId="2" contactPoint="start" />
  </link>
  <planView>
    <geometry s="0.0" x="40.0" y="300.0" hdg="0.0" length="800.0">
      <line />
    </geometry>
  </planView>
  <lanes>
    <laneSection s="0.0">
      <right>
        <lane id="-1" type="driving" level="0">
          <width sOffset="0.0" a="10.0" b="0.0" c="0.0" d="0.0" />
        </lane>
        <lane id="-2" type="driving" level="0">
          <width sOffset="0.0" a="10.0" b="0.0" c="0.0" d="0.0" />
        </lane>
      </right>
    </laneSection>
  </lanes>
</road>

```

**Figura 19. Especificación de una vía en Open Drive**

<sup>7</sup> Los elementos especificados en OpenDrive, se inspiran en el modelo LBS descrito en el capítulo 2.



En la Figura 20 se ilustra el escenario de Cruce por Carril Lento diseñado bajo OpenDrive y visualizado por el componente MovSimViewer que se describió en el capítulo anterior. Este escenario tiene las siguientes características:

- Del punto 1 al punto 2 existe una distancia de 1400 metros.
- Del punto 1 al punto 3 existe una distancia de 1408.93 metros.
- El escenario está conformado por seis calles R1, R2, R3, R4, R5, y R6.
  - R1 y R5 tienen 800 metros de longitud, con dos carriles cada una.
  - R2 tiene 200 metros de longitud y 5 carriles.
  - R4 tiene 408.1 metros y 1 carril. Tiene conexión en el punto final de R2.
  - R3 y R6 tiene 400 metros de longitud.

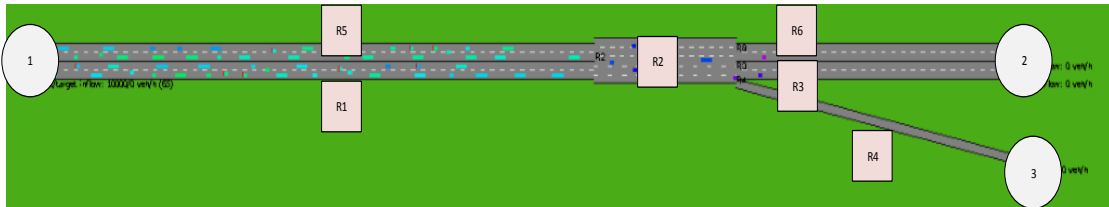


Figura 20. Escenario Cruce por Carril Lento

## 8.2 Variables

En la Tabla 17 se definen las variables asociadas al experimento. Cada variable tiene definida un dominio de valores asociadas a una semántica dentro del experimento, que son mapeadas a un conjunto de valores validos en el simulador.

Tabla 17. Variables del Experimento

TIPO VARIABLE	VARIABLE	DESCRIPCIÓN	MUESTRA	VALORES EN EL SIMULADOR
Variables Independientes	Flujo Vehículos	Número de vehículos por hora que transitan en una vía	ALTO	5000
			MEDIO ALTO	3600
			MEDIO	2400
			MEDIO BAJO	1200
			BAJO	600
	Activación Resolución	Define el porcentaje de vehículos	ALTO	100% de los vehículos

		que utilizan modelo de resolución de conflictos o no.	MEDIO	50% de los vehículos
			BAJO	30% de los vehículos
	Benevolencia	Define el porcentaje de vehículos que tienen benevolencia	ALTO	100% de los vehículos
			MEDIO	50% de los vehículos
			BAJO	30% de los vehículos
<b>Variables Dependientes</b>	Tiempo de Viaje	Medida en segundos	-	-
	Energía Consumida	Unidades de combustible consumidas en m3/s.	-	-
<b>Variables Intervinientes</b>	Escenario	Escenario de Simulación utilizado en los experimentos	-	Se utiliza el escenario de Cruce por Carril Lento. Nota: El escenario de Doble Intersección aun no es soportado por MovSim
	Modelo de Cambio de Línea (Line Based)	Modelo de cambio de línea que utilizan los vehículos.	-	Se utiliza ModelParameterMOBIL como modelo más común de simulación. ModelParameterMOBIL tiene en cuenta la distancia y la aceleración del vehículo de enfrente, junto la distancia y aceleración del

				vehículo más cercano a la línea destino [48].
	Modelo de Aceleración (Line Based)	Corresponde al modelo de aceleración utilizado.	-	Se utiliza ModelParameterACC como modelo más común de simulación. El ModelParameterACC es descrito por Kesting en [49]
	Tipo de Vehículo	Está definido por el tamaño del vehículo y el factor de desaceleración. Se utilizan dos valores típicos (Longitud: 16, Longitud 9)	-	Se utiliza los vehículos de longitud 9 pies con un factor de 0.7 y de 16 pies con un factor 0.3
	Modelo de Consumo de Energía	Definido por el modelo de consumo energético. El modelo implementado por MovSim tiene en cuenta condiciones de fricción, aspectos del motor (ej. cilindraje)	-	Se utiliza el modelo de consumo con las siguientes características: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Masa: 1000 gr</li> <li>- Constante Fricción: 0.015</li> <li>- Cilindraje: 1.8 Lt</li> <li>- Poder Eléctrico: 100 kW</li> </ul>
	Crédito Inicial	El valor del crédito inicial que se asigna a cada agente tráfico	-	Se utiliza el valor entero 100

	Valor Base de Intención	Corresponde al valor base de oferta para las intenciones		Se utiliza un valor constante de 10 para todas las intenciones
--	-------------------------	--	--	--

De acuerdo a la tabla anterior, se realizaron 50 experimentos; 45 experimentos que resultan de la combinación de las tres variables dependientes (Flujo de Vehículos, Activación de la Resolución y Benevolencia) y 5 experimentos adicionales utilizando el comportamiento por defecto del simulador, variando solamente el Flujo de Vehículos.

### 8.3 Resultados

Durante la primera parte de la experimentación, se ejecutaron los 5 experimentos que utilizan el comportamiento por defecto del simulador, bajo las siguientes características:

- Se realizaron 10 repeticiones para cada experimento.
- Se varió el flujo de vehículos (ALTO, MEDIO-ALTO, MEDIO, MEDIO BAJO, BAJO) con una duración del experimento de 3600 segundos y un tiempo de paso de la simulación 0.2<sup>s</sup>.

En la Tabla 18, se presentan los resultados para el Tiempo de Viaje y el Consumo de Energía en términos de la media de y la varianza.

**Tabla 18. Experimentos sin MITC**

	FLUJO BAJO		FLUJO MEDIO BAJO		FLUJO MEDIO		FLUJO MEDIO ALTO		FLUJO ALTO	
	TIEMPO	CONSUMO	TIEMPO	CONSUMO	TIEMPO	CONSUMO	TIEMPO	CONSUMO	TIEMPO	CONSUMO
MEDIA	52.4826	0.0270	57.1996	0.0513	79.1318	0.0717	87.8295	0.0703	88.2295	0.0702
VARIANZA	0.0655	0.0000	0.0801	0.0000	0.3356	0.0000	1.5641	0.0000	0.9277	0.0000
% VARIANZA	0.1248	0.0001	0.1400	0.0002	0.4241	0.0001	1.7808	0.0001	1.0515	0.0001

Así mismo, para un análisis comparativo inicial, se ejecutaron 5 experimentos utilizando el modelo MITC bajos las siguientes características:

- Se realizaron 10 repeticiones para cada experimento.
- Se varió el flujo de vehículos (ALTO, MEDIO-ALTO, MEDIO, MEDIO BAJO, BAJO) con una duración del experimento de 3600 segundos y un tiempo de paso de la simulación 0.2
- Las variables Activación de la Resolución y Benevolencia fueron establecidas en ALTO.

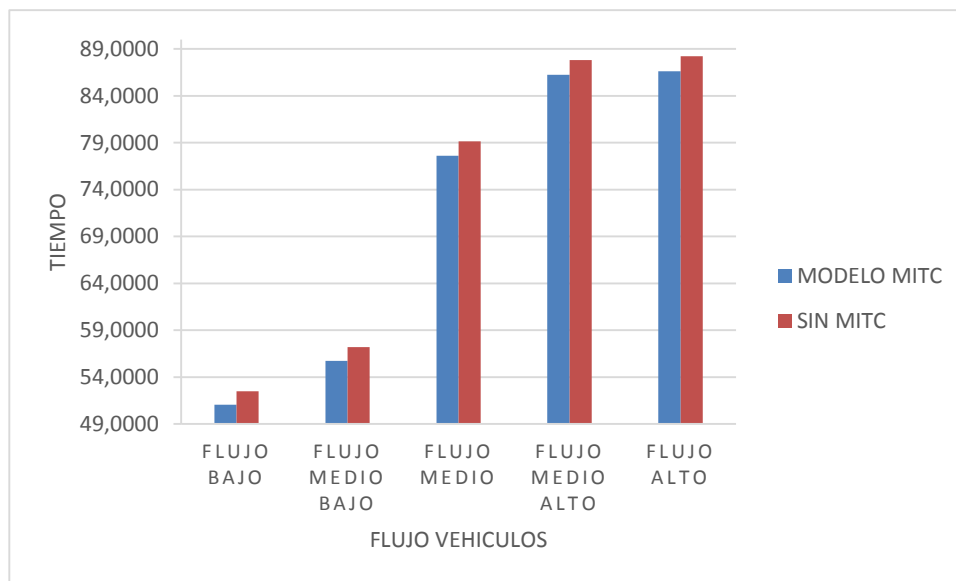
<sup>8</sup> La duración constituye el tiempo que dura la simulación hasta alcanzar 3600 (representa una hora en MovSim) con un valor de incremento por ciclo de 0.2. Es decir, en este caso se ejecutarían 18000 ciclos de simulación.

Los resultados son presentados en la Tabla 19. Como puede observarse, la varianza entre las repeticiones es muy pequeña, lo que permitió omitir las repeticiones para los experimentos subsecuentes.

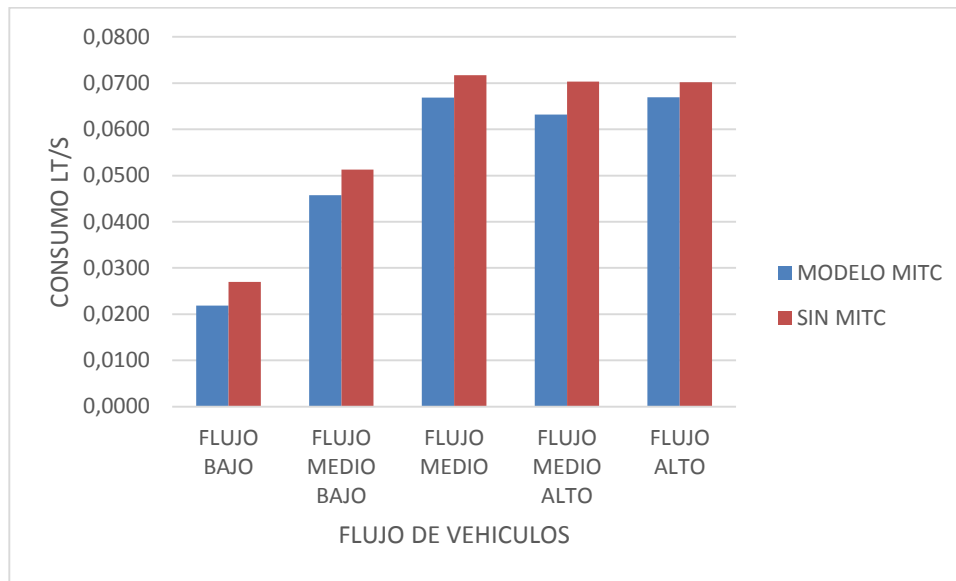
**Tabla 19. Experimentos con MITC.**

	FLUJO BAJO		FLUJO MEDIO BAJO		FLUJO MEDIO		FLUJO MEDIO ALTO		FLUJO ALTO	
	TIEMPO	CONSUMO	TIEMPO	CONSUMO	TIEMPO	CONSUMO	TIEMPO	CONSUMO	TIEMPO	CONSUMO
MEDIA	50.9189	0.0217	55.6761	0.0471	77.5251	0.0655	86.4722	0.0657	86.6250	0.0660
VARIANZA	0.2035	0.0000	0.1029	0.0000	0.4778	0.0000	1.4499	0.0000	1.4107	0.0000
% VARIANZA	0.3996	0.0660	0.1849	0.0231	0.6164	0.0188	1.6768	0.0095	1.6285	0.0088

De acuerdo la Figura 21 y 22, el modelo MITC otorga una mejora en tiempo de viaje 2.17% por automóvil y del 8.8% para consumo energético. A primera vista, estos indicadores plantean una mejora en un escenario local de 1400 metros y que escalado a escenarios de mayores dimensiones (ej. un área metropolitana) puede representar grandes beneficios.



**Figura 21. Comparación Tiempo de Viaje**



**Figura 22. Comparación Tasa de Consumo**

La segunda parte de los experimentos, se enfocó en el análisis de las variables Activación Resolución y Benevolencia. Estas variables determinan el comportamiento del modelo ante situaciones excepcionales, tales como errores de comunicación de infraestructura y agentes con carencia de cultura de tráfico. En la Tabla 20, se presentan los resultados ante dichas situaciones.

**Tabla 20. Resultados Activación Resolución**

		ACTIVACIÓN RESOLUCIÓN					
		BAJO		MEDIO		ALTO	
		TIEMPO VIAJE (s)	CONSUMO (l/s)	TIEMPO VIAJE (s)	CONSUMO (l/s)	TIEMPO VIAJE (s)	CONSUMO (l/s)
FLUJO VEHICULOS	BAJO	52.4034	0.0278	52.4897	0.0280	50.8908	0.0203
	MEDIO BAJO	57.5977	0.0505	58.8215	0.0490	56.3975	0.0403
	MEDIO	78.3467	0.0704	78.8633	0.0671	76.7402	0.0603
	MEDIO ALTO	87.3960	0.0830	87.5908	0.0829	86.3709	0.0732
	ALTO	88.9589	0.0896	88.5708	0.0846	87.0089	0.0742

Como se puede observar en la Figura 23 y 24, el modelo tiene un comportamiento similar al comportamiento base (es decir, la simulación sin incluir el modelo), cuando la Activación de la Resolución está en valores BAJO y MEDIO. Esto significa que el modelo puede convivir en

escenarios mixtos de cooperación e indiferencia sin afectar negativamente el rendimiento del sistema.

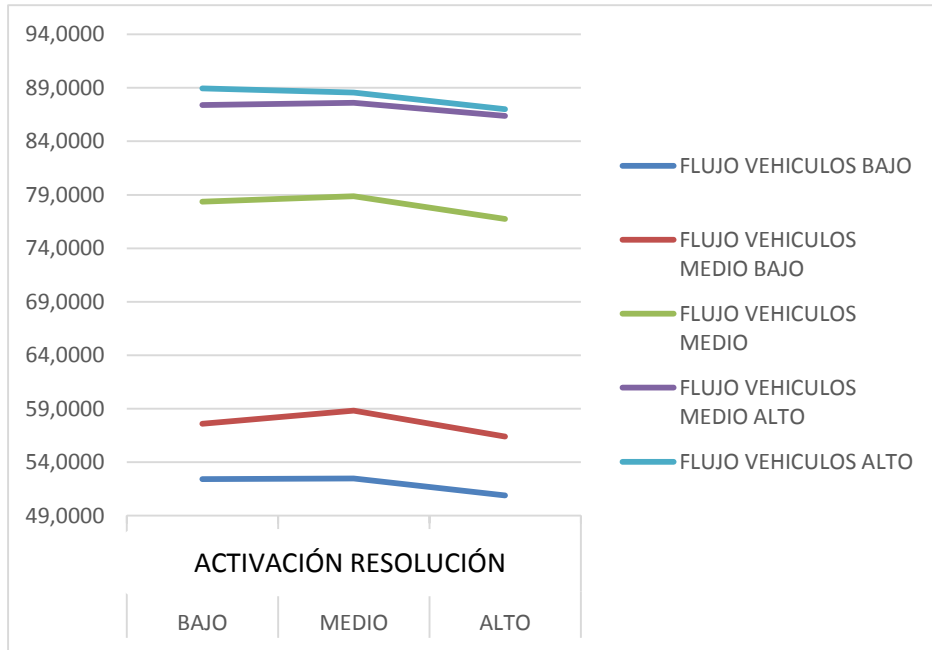


Figura 23. Comparación Resultados Activación Resolución – Tiempo Viaje

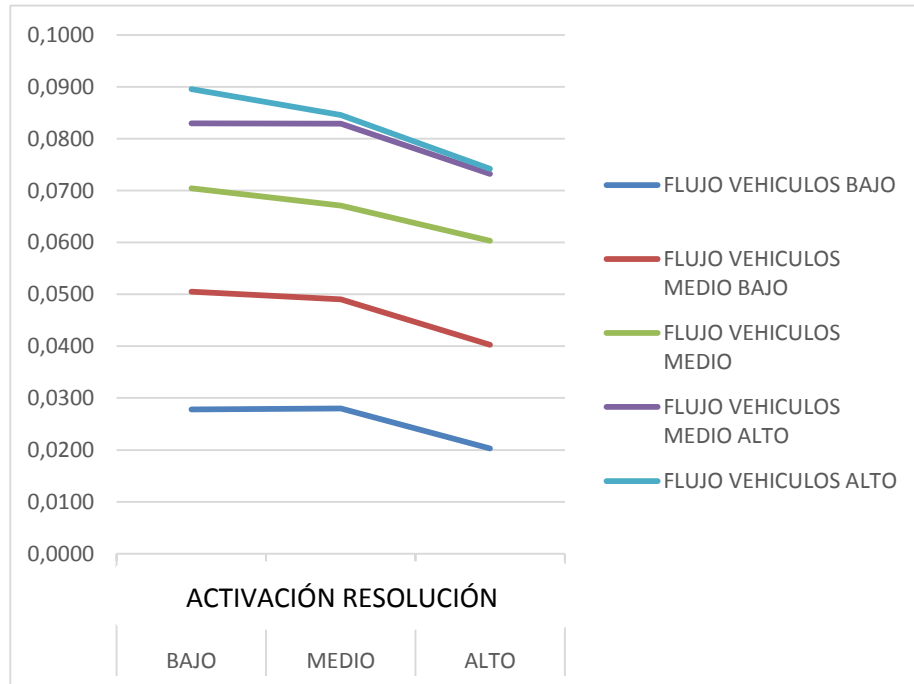
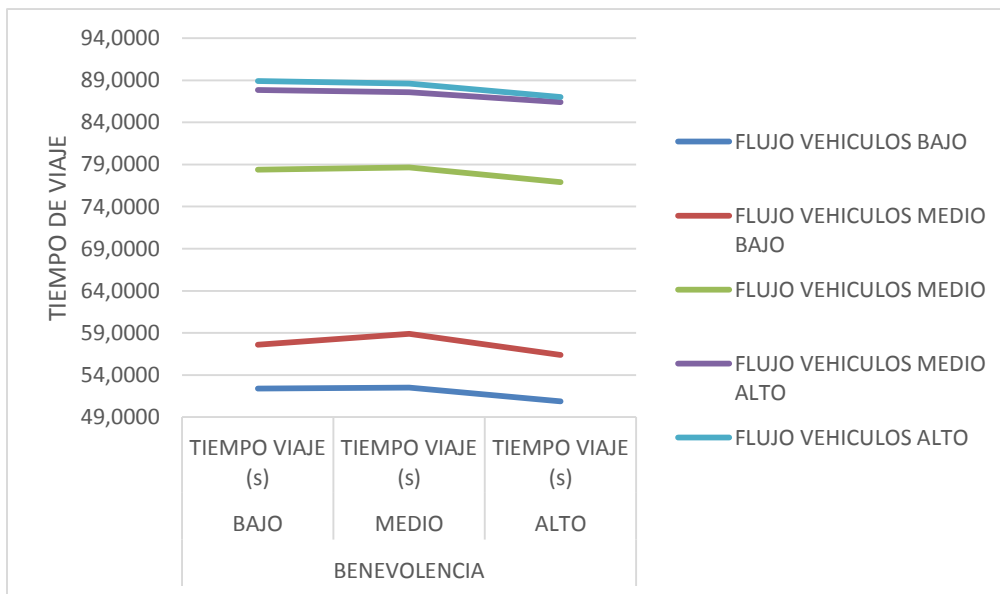


Figura 24. Comparación Resultados Activación Resolución – Consumo

Así mismo, los resultados para la variable Benevolencia se presentan en la Tabla 21. Como puede observarse en la Figura 25 y 25, solo cuando existe una mayor benevolencia (específicamente, para los valores ALTO) las condiciones de tráfico mejoran significativamente. Esto resalta la importancia de la cultura de tráfico en una ciudad.

**Tabla 21. Resultados Benevolencia**

		BENEVOLENCIA							
		COMPLETA (100%)		BAJO		MEDIO		ALTO	
		TIEMPO VIAJE (s)	CONSUMO (l/s)	TIEMPO VIAJE (s)	CONSUMO (l/s)	TIEMPO VIAJE (s)	CONSUMO (l/s)	TIEMPO VIAJE (s)	CONSUMO (l/s)
FLUJO VEHICULOS	BAJO	50.8952	0.0237	52.3943	0.2703	52.4902	0.2930	50.8876	0.0271
	MEDIO BAJO	55.8532	0.0480	57.6105	0.0581	58.8885	0.0491	56.3801	0.0445
	MEDIO	76.8654	0.0615	78.3701	0.0765	78.6387	0.0692	76.8881	0.0634
	MEDIO ALTO	86.2932	0.0733	87.8586	0.0895	87.5933	0.0881	86.3905	0.0699
	ALTO	87.0046	0.0778	88.9031	0.0896	88.6101	0.0839	87.0031	0.0730



**Figura 25. Comparación Resultados Benevolencia – Tiempo de Viaje**



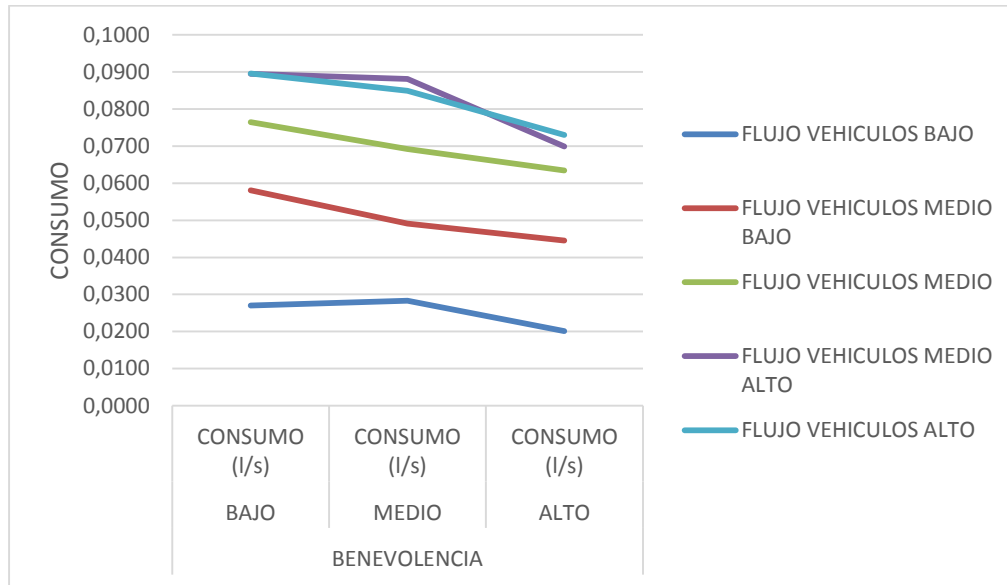


Figura 26. Comparación Resultados Benevolencia – Consumo

## 9. CONCLUSIONES

El diseño y construcción de un Modelo Basado en Intenciones para Resolver Conflictos de Tráfico aporta un enfoque diferente para resolver los problemas de congestión. MITC permite expresar explícitamente los mecanismos de cooperación entre agentes de tráfico, en escenarios donde se presentan conflictos tanto por recursos como por metas. En este sentido, MITC proporciona un conjunto de ventajas mencionadas a continuación:

1. El Modelo Multiagente está diseñado para tolerar diferentes requisitos de un Sistema de Tráfico Urbano como la concurrencia, la escalabilidad y su complejidad. En términos computacionales, MITC permite abordar los problemas de tráfico de forma distribuida, lo que aporta importantes ventajas en términos de disponibilidad y la tolerancia a fallos.
2. El Modelo Multiagente plantea un Protocolo de Resolución de Conflictos que soporta las características esenciales como la concurrencia y su temporalidad.
3. El Modelo Multiagente abarca transversalmente todos los aspectos de un Sistema de Tráfico, incluyendo los ámbitos de control, administración y supervisión.
4. La definición del concepto de Intención y su jerarquización en tres niveles, permite modelar las características de los agentes de tráfico de forma natural y con mayor acercamiento a la realidad.
5. El Modelo de Toma de Decisiones basado en Teoría de Juegos, garantiza la solución de un conflicto de forma racional y equilibrada. Adicionalmente, su inspiración en el concepto de benevolencia, permite analizar aspectos esenciales como la conciencia pública de tráfico.

Este trabajo abre la puerta a un gran número de aplicaciones. Por ejemplo, en el desarrollo de campañas de inteligencia vial y cultura de tráfico, proporcionando elementos formales y medibles en términos de tiempo de desplazamientos. Así mismo, sería de gran utilidad incluir experimentos que determinen la reducción de la accidentalidad gracias MITC, en pro de incorporar elementos de Seguridad Vial dando como resultado un marco pedagógico para el tráfico urbano. En este sentido y aunque en las ciudades Latinoamérica las redes de tráfico están lejos de implementar tecnologías como redes inter-vehiculares o vehículos inteligentes, MITC es un modelo adaptable que puede ser implementado de forma parcial. Por lo tanto, resulta interesante diseñar un Sistema de Control de Tráfico Urbano basado en MITC, que plantee semáforos intencionales y sus respectivas estrategias de solución de conflictos. De la misma manera, se puede generar un sistema de recomendación de tráfico en tiempo real que asista a los usuarios cuando conducen su vehículo.

Por otro lado, son múltiples los retos computacionales que abre este trabajo. Entre ellos se encuentran:

- La construcción de un simulador basado en agentes e inspirado en el modelo MITC. Dicho simulador no solo debe soportar diseño basado en agentes, sino las estructuras genéricas para diferentes artefactos entre los que se encuentran la jerarquía de intenciones y los modelos de toma de decisiones entre otros.
- El diseño de un modelo que permita expresar las Intenciones Derivadas por Plan en términos de Intenciones Inmediatas y viceversa.
- La construcción de otros modelos de Toma de Decisiones para Resolución de Conflictos basados en técnicas de inteligencia computacional como Lógica Difusa o Redes Neuronales.

MITC es un modelo de gran alcance con un impacto significativo al ser implementado en escenarios reales de tráfico, ya que puede mitigar algunos factores que inciden negativamente en la calidad de vida de las personas. Por ejemplo, en la disminución en la contaminación atmosférica, ya que los vehículos pasan menos tiempo en las calles, o en la reducción de ruido ambiente, pues evitan la emisión de señales sonoras de los vehículos dado que los conflictos son resueltos de forma automática.

## 10. BIBLIOGRAFIA

- [1] D. Zhao, Y. Dai y Z. Zhang, «Computational Intelligence in Urban Traffic Signal Control: A Survey,» *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, vol. PP, n° 99, pp. 1-10, 2011.
- [2] R. Fernandes, «A BDI-based approach for assessment of drivers decision-making in commuter,» 2002.
- [3] A. Intelligence y A. C. Applications, *Artificial Intelligence in Transportation*, 2007.
- [4] A. G. Boero, «Artificial intelligence techniques for urban traffic control,» *Transportation Research Part A: General*, vol. 25, n° 5, pp. 319-325, 1991.
- [5] M. Bielli, G. Ambrosino y M. Boero, *Artificial intelligence applications to traffic engineering*, Vsp, 1994.
- [6] T. Akiyama y M. Okushima, «Advanced fuzzy traffic controller for urban expressways,» *International Journal of Innovative Computing Information and Control*, vol. 2, n° 2, pp. 339-355, #apr# 2006.
- [7] K. M. Yusof, «Intelligent traffic lights control by fuzzy logic,» 1996.
- [8] D. Srinivasan, M. C. Choy y R. L. Cheu, «Neural networks for real-time traffic signal control,» *Ieee Transactions On Intelligent Transportation Systems*, vol. 7, n° 3, pp. 261-272, #sep# 2006.
- [9] H. B. Yin, S. C. Wong, J. M. Xu y C. K. Wong, «Urban traffic flow prediction using a fuzzy-neural approach RID A-7258-2008,» *Transportation Research Part C-emerging Technologies*, vol. 10, n° 2, pp. 85-98, #apr# 2002.
- [10] T. Ma y B. Abdulhai, «Genetic algorithm-based optimization approach and generic tool for calibrating traffic microscopic simulation parameters,» *Intelligent Transportation Systems and Vehicle-highway Automation 2002: Highway Operations, Capacity, and Traffic Control*, n° 1800, pp. 6-15, 2002.
- [11] M. C. Choy, D. Srinivasan y R. L. Cheu, «Cooperative, hybrid agent architecture for real-time traffic signal control,» *Ieee Transactions On Systems Man and Cybernetics Part A-systems and Humans*, vol. 33, n° 5, pp. 597-607, #sep# 2003.

- [12]J. Z. Hernandez, S. Ossowski y A. Garcia-Serrano, «Multiagent architectures for intelligent traffic management systems,» *Transportation Research Part C-emerging Technologies*, vol. 10, n° 5-6, pp. 473-506, #oct# 2002.
- [13]B. Chen y H. H. Cheng, «A Review of the Applications of Agent Technology in Traffic and Transportation Systems,» *Ieee Transactions On Intelligent Transportation Systems*, vol. 11, n° 2, pp. 485-497, #jun# 2010.
- [14]J. Hillenbrand, A. M. Spieker y K. Kroschel, «A multilevel collision mitigation approach - Its situation assessment, decision making, and performance tradeoffs,» *Ieee Transactions On Intelligent Transportation Systems*, vol. 7, n° 4, pp. 528-540, #dec# 2006.
- [15]J. L. Adler y V. J. Blue, «A cooperative multi-agent transportation management and route guidance system,» *Transportation Research Part C-emerging Technologies*, vol. 10, n° 5-6, pp. 433-454, #oct# 2002.
- [16]J. L. Adler, G. Satapathy, V. Manikonda, B. Bowles y V. J. Blue, «A multi-agent approach to cooperative traffic management and route guidance,» *Transportation Research Part B-methodological*, vol. 39, n° 4, pp. 297-318, #may# 2005.
- [17]P. G. Balaji, X. German y D. Srinivasan, «Urban traffic signal control using reinforcement learning agents,» *Iet Intelligent Transport Systems*, vol. 4, n° 3, pp. 177-188, #sep# 2010.
- [18]J. C. Burguillo-Rial, P. S. Rodriguez-Hernandez, E. Costa-Montenegro y F. Gil-Castineira, «History-based Self-organizing Traffic Lights,» *Computing and Informatics*, vol. 28, n° 2, pp. 157-168, 2009.
- [19]R. S. Chen, D. K. Chen y S. Y. Lin, «ACTAM: Cooperative multi-agent system architecture for urban traffic signal control,» *Ieice Transactions On Information and Systems*, vol. E88D, n° 1, pp. 119-126, #jan# 2005.
- [20]N. Zhang, F. Y. Wang, F. H. Zhu, D. B. Zhao y S. M. Tang, «DynaCAS: Computational Experiments and Decision Support for ITS,» *Ieee Intelligent Systems*, vol. 23, n° 6, pp. 19-23, #nov# 2008.
- [21]R. J. F., R. H. Bordini, A. L. C., S. Bampi, R. Liu y D. V. Vliet, «Using BDI agents to improve driver modelling in a commuter scenario,» *Transportation Research Part C-emerging Technologies*, vol. 10, n° 5-6, pp. 373-398, #oct# 2002.

- [22]D. A. Roozmond, «Using intelligent agents for pro-active, real-time urban intersection control,» *European Journal of Operational Research*, vol. 131, n° 2, pp. 293-301, #jun# 2001.
- [23]A. L. C., F. Klugl y S. Ossowski, «Agents in traffic and transportation: Exploring autonomy in logistics, management, simulation, and cooperative driving,» *Transportation Research Part C-emerging Technologies*, vol. 13, n° 4, pp. 251-254, #aug# 2005.
- [24]H. L. De, «Intelligent vehicle survey and applications,» *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, vol. 186, n° 1, pp. 205-235, 2009.
- [25]F. L. Tang, M. Y. Guo, M. L. Li y C. L. Wang, «Implementation of an Intelligent Urban Traffic Management System Based on a City Grid Infrastructure RID B-7695-2009,» *Journal of Information Science and Engineering*, vol. 24, n° 6, pp. 1821-1836, #nov# 2008.
- [26]R. Bishop, «A survey of intelligent vehicle applications worldwide,» 2000.
- [27]J. Liu, F. Y. Ren, L. M. Miao y C. Lin, «A-ADHOC: An Adaptive Real-time Distributed MAC Protocol for Vehicular Ad Hoc Networks,» *Mobile Networks & Applications*, vol. 16, n° 5, pp. 576-585, #oct# 2011.
- [28]S. Kato y S. Tsugawa, «Cooperative driving of autonomous vehicles based on localization, inter-vehicle communications and vision systems,» *Jsaе Review*, vol. 22, n° 4, pp. 503-509, #oct# 2001.
- [29]L. Yu, Z. K. Shi y B. C. Zhou, «Kink-antikink density wave of an extended car-following model in a cooperative driving system,» *Communications In Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 13, n° 10, pp. 2167-2176, #dec# 2008.
- [30]Y. M. Wang, «Game theory based cooperative driving algorithm for intersection,» *Huazhong Keji Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, vol. 39, n° SUPPL. 2, pp. 385-387+391, 2011.
- [31]S. D. Balaji,, «Distributed multi-agent type-2 fuzzy architecture for urban traffic signal control,» 2009.
- [32]Y. Dong, J. Hallam y M. S. Li, «On constructing a cooperative paradigm,» *Applied Artificial Intelligence*, vol. 16, n° 3, pp. 209-241, #mar# 2002.

- [33]J. Rodriguez, M. Torres y E. Gonzales, «La Metodología AOPOA,» 2007.
- [34]J. Ferber, *Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*, 1st ed., Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1999.
- [35]E. Gonzales y C. Bustacara, *Desarrollo de Aplicaciones Basadas en Sistemas Multiagentes*, E. Javeriana, Ed., 2007.
- [36]M. Woolridge y M. J. Wooldridge, *Introduction to Multiagent Systems*, New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [37]N. T. Ratrouy y S. M. Rahman, «A Comparative Analysis of Currently Used Microscopic and Macroscopic Traffic Simulation Software,» *Arabian Journal For Science and Engineering*, vol. 34, n° 1B, pp. 121-133, #apr# 2009.
- [38]P. Hidas, «Modelling vehicle interactions in microscopic simulation of merging and weaving,» *Transportation Research Part C-emerging Technologies*, vol. 13, n° 1, pp. 37-62, #feb# 2005.
- [39]U. Klein, T. Schulze y S. Strassburger, «Traffic simulation based on the High Level Architecture,» 1998.
- [40]Y. C. Ma, R. Fries, M. Chowdhury y I. Inamdar, «Evaluation of the integrated application of intelligent transportation system technologies using stochastic incident generation and resolution modeling,» *Simulation-Transactions of the Society For Modeling and Simulation International*, vol. 88, n° 1, pp. 123-133, #jan# 2012.
- [41]S. Panwai y H. Dia, «Comparative evaluation of microscopic car-following behavior RID B-1542-2008,» *Ieee Transactions On Intelligent Transportation Systems*, vol. 6, n° 3, pp. 314-325, #sep# 2005.
- [42]K. I. Ahmed, «Modeling drivers' acceleration and lane changing behaviors,» 1999.
- [43]Y. Shoham, «Multiagent Systems; Algorithmic, Game Theoric, and Logical Fundactions,» 2009.
- [44]A. Kesting , M. Budden, R. Germ y M. Treiber , «MovSIM,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.h2063376.stratoserver.net/movsim/>. [Último acceso: 12 June 2013].

- [45]GPL, «GNU,» [En línea]. Available: <http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>. [Último acceso: 2007 June 10].
- [46]R. Johnson, E. Gamma, J. Vlissides y R. Helm, Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software, Addison-Wesley, 1995.
- [47]Vires , «OpenDrive,» [En línea]. Available: <http://www.opendrive.org/projectFeatures.htm>. [Último acceso: 20 06 2013].
- [48]A. Kesting, M. Treiber y D. Helbing, «General Lane-Changing Model MOBIL for Car-Following Models,» [En línea]. Available: [http://www.akesting.de/download/MOBIL\\_TRR\\_2007.pdf](http://www.akesting.de/download/MOBIL_TRR_2007.pdf). [Último acceso: 07 Julio 2013].
- [49]A. Kesting, M. Treiber y D. Helbing, «Enhanced Intelligent Driver Model to Access the Impact of Driving Strategies on Traffic Capacity,» *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 368, n° 1928, pp. 4585-4605, 2010.
- [50]W. M. Hu, X. J. Xiao, D. Xie, T. N. Tan y S. Maybank, «Traffic accident prediction using 3-D model-based vehicle tracking,» *Ieee Transactions On Vehicular Technology*, vol. 53, n° 3, pp. 677-694, #may# 2004.