

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS EXPERTOS MULTIAGENTE A LA GESTIÓN SEMAFÓRICA DE LA CIUDAD DE VALLADOLID (ESPAÑA)*

Application of multi-agent expert systems to the management of traffic lighting systems in the city of Valladolid (Spain)

Por: **DR. PEDRO SANZ ANGULO**

Profesor del Departamento de Organización de Empresas y C. e I.M.
Escuela de Ingenierías Industriales
Universidad de Valladolid (España)
psangulo@eii.uva.es

Por: **DR. JUAN JOSÉ DE BENITO MARTÍN**

Profesor del Departamento de Organización de Empresas y C. e I.M.
Escuela de Ingenierías Industriales
Universidad de Valladolid (España)
debenito@eii.uva.es

Por: **JESÚS GALINDO MELERO**

Promotor tecnológico. Fundación General de la Universidad de Valladolid
Universidad de Valladolid (España)
jgalindom@funge.uva.es

RESUMEN: El constante incremento de vehículos en la red viaria está en el origen de numerosos problemas que afectan directamente a los ciudadanos y a los que los gobernantes están obligados a responder con todos los medios a su disposición. Sin embargo, la escasez de recursos condiciona esta respuesta por lo que es necesario encontrar soluciones eficientes, innovadoras e inteligentes, sobre todo en el ámbito urbano donde los problemas son más acuciantes.

Este artículo describe parte del trabajo que estamos realizando dirigido a ofrecer una solución eficiente a la gestión semafórica en la ciudad de Valladolid (España). Como

* Recibido para publicación: 25 de noviembre de 2013.

Enviado para evaluación externa: 26 de noviembre de 2013.

Recibida evaluación externa positiva: 10 de diciembre de 2013.

Aceptado para publicación: 17 de diciembre de 2013.

objetivo final, se pretende desarrollar una herramienta software, basada en métodos y conceptos de la Inteligencia Artificial, que permita a los elementos involucrados en la regulación activa de la ciudad coordinarse y auto-gestionarse, de forma que sean capaces de responder ágilmente a las necesidades cambiantes del tráfico.

PALABRAS CLAVE: ciudad inteligente, gestión semafórica, sistemas multiagentes, sistemas expertos, simulación.

ABSTRACT: The steady increase in vehicles on the road network is the source of several problems that directly affect citizens. Governments are forced to respond with all the means at their disposal. However, resource scarcity influences this response so it is necessary to find efficient, innovative and intelligent solutions, especially in the urban environment where problems are more severe.

This article describes part of the work we are doing aimed at providing an efficient solution to the traffic lights management in the city of Valladolid (Spain). The final objective is to develop a software tool, based on artificial intelligence concepts and methods, able to ensure that the elements involved in the active regulation of the city are coordinated and self-managed in order to respond quickly to changing traffic needs.

KEY WORDS: smart city, traffic light management, multi-agent systems, expert systems, simulation.

Sumario: I. INTRODUCCIÓN.- II. LA CIUDAD INTELIGENTE Y LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTES.- III. GESTIÓN DEL TRÁFICO.- 1. Características de la regulación del tráfico en Valladolid.- 2. El método actual de gestión del tráfico en Valladolid.- IV. OBJETIVO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.- V. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DEL PASEO DE ZORRILLA.- 1. El sistema a estudiar.- 2. Formulación y construcción del modelo VI. CONSTRUYENDO UNA SOLUCIÓN A LA GESTIÓN DEL TRÁFICO.- 1. Justificación del uso de sistemas multi-agente y sistemas expertos.- 2. La aplicación DVEBreeder y su personalización.- VII. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.- VIII. AGRADECIMIENTOS.- IX. NOTA BIBLIOGRÁFICA.

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de las últimas décadas, y en especial desde principios de los noventa, se ha producido un notable incremento en el número de vehículos¹ que circulan por la red viaria, siendo la gran mayoría de ellos automóviles de uso particular. El aumento del poder adquisitivo de los ciudadanos, la segmentación de los mercados, las facilidades de acceso al crédito, la reducción de los precios de venta, el crecimiento de los mercados de segunda mano, etc., han permitido democratizar este bien, convirtiéndolo en el medio de transporte imprescindible para la mayoría de los ciudadanos y en motor de desarrollo de numerosas ciudades.

Sin embargo, el crecimiento desmesurado del parque automovilístico se está convirtiendo, irónicamente, en la principal amenaza de las urbes: el mayor tránsito vial se ha traducido, sobre todo en las grandes poblaciones, en atascos, accidentes y problemas medioambientales que reducen la calidad de vida de sus habitantes. Para responder eficientemente a estos problemas es preciso garantizar una buena movilidad, y la mejor forma de lograrlo, sobre todo cuando los recursos son escasos, es a través de una correcta gestión y planificación del tráfico. Sólo así seremos capaces de mejorar el funcionamiento del ecosistema urbano, al evitar gran parte de los problemas que se pueden encontrar los ciudadanos y que merman el bienestar de la sociedad en general.

Como consecuencia de esta necesidad de facilitar la movilidad y mejorar la gestión del tráfico surge la Ingeniería de Tráfico (TE, *Traffic Engineering*) o Ingeniería del Transporte², disciplina que trata de lograr un flujo de tráfico eficiente a través de un adecuado diseño de las infraestructuras y sistemas de tráfico. La TE persigue resolver problemas que van desde el incremento desmesurado de los tiempos de viaje hasta la contaminación atmosférica y acústica de las ciudades, pasando por la reducción de los costes de operación, la seguridad vial,..., aspectos que, por lo general, provocan un deterioro progresivo de la calidad de vida.

En materia de transporte existen múltiples alternativas para conseguir una movilidad práctica y eficaz, entre las que se encuentra la mejora de las infraestructuras. Sin embargo, los recursos de las ciudades son limitados y los gobernantes se ven obligados a gestionar más eficientemente la demanda de tráfico mediante el despliegue de sistemas de transporte inteligentes (ITS, *Intelligent Transport Systems*). La posibilidad de que las ciudades sean más inteligentes empleando tecnologías avanzadas para recopilar más datos y de mayor calidad, analizarlos de manera inteligente y conectarlos mediante redes eficaces, hace posible la prestación de servicios más eficientes y orientados más específicamente a los ciudadanos.

¹ Como dato, el número de matriculaciones en España ha crecido considerablemente pasando de 13.881.323 millones de vehículos en el año 1988 a 31.269.081 en el año 2011 (fuente: Anuario Estadístico General Año 2011). Este crecimiento se ha debido, principalmente, al progreso industrial y económico que ha vivido España en los últimos 30 años.

² El instituto de Ingeniería de Transporte (1998) define la Ingeniería del Transporte como: “La aplicación práctica de principios tecnológicos y científicos a la planificación, diseño funcional, operación y gestión de los medios físicos para cualquier modo de transporte, en orden a proporcionar movimiento a personas o cosas, en forma segura, rápida, confortable, conveniente, económica y compatible con el medio ambiente”.

Dentro de la gestión del tráfico, la regulación de los grupos semafóricos constituye una actividad clave, ya que son los principales elementos para llevar a cabo una regulación activa del tráfico. Pero para que dicha actividad sea lo más eficiente posible necesitamos un elevado grado de coordinación que permita responder de forma ágil y dinámica a cualquier circunstancia o evento que se produzca en las vías urbanas. De esta forma, podríamos ser capaces de configurar de forma dinámica redes de semáforos para, por ejemplo, agilizar el flujo en vías congestionadas, o para priorizar vías alternativas o de escape como respuesta a un accidente de tráfico o a un evento deportivo.

Si queremos ser lo más eficientes posibles, debe ser el propio sistema el que se autogestione y se adapte dinámicamente, por lo que es preciso una cooperación entre los elementos semafóricos y los mecanismos de medición que nos proporcionan información real y dinámica de los flujos de tráfico. Esta cooperación plantea, sin duda alguna, problemas y exigencias difíciles de solventar si no se tiene en cuenta las tecnologías de la información y la comunicación (ICT, *Information and Communication Technologies*). El objetivo primordial ha de ser, por tanto, proveer una nueva vía de actuación eficiente e innovadora que favorezca esta gestión del tráfico y que permita agilizar los flujos de vehículos en las ciudades, con las ventajas que ello comporta tanto para los ciudadanos como para la sociedad en general.

Para proporcionar esta nueva herramienta hemos acudido al mundo empresarial y hemos observado las similitudes que presenta nuestro problema con el de aquellas empresas que pretenden dar una respuesta ágil y eficiente a las necesidades de sus clientes. Dado los elevados niveles de competencia y dinamismo actuales, las empresas se ven obligadas a colaborar entre sí para sobrevivir. Esta necesidad de cooperación ha conducido al nacimiento del paradigma de empresa virtual dinámica (DVE, *Dynamic Virtual Enterprise*), que representa un modelo organizativo capaz de asegurar la supervivencia de las empresas del siglo XXI.

Trasladándonos a nuestro problema, partimos de la necesidad de agilizar la respuesta a las situaciones variables y estocásticas asociadas al tráfico, lo que nos hace considerar la formación de Redes de Tráfico Virtuales y Dinámicas (DVTN, *Dynamic Virtual Traffic Networks*) y a adaptar algunas de las ideas y herramientas ICT construidas ad hoc de las DVE. Aquí es donde podemos englobar parte del trabajo que se está desarrollando y que se empieza a presentar a lo largo de esta comunicación.

Así, en este documento explicaremos los principales conceptos necesarios para comprender nuestro trabajo de investigación (como son “la ciudad inteligente”, “los sistemas de transporte inteligentes”, los aspectos clave en “la gestión del tráfico”, etcétera), plantearemos el objetivo del proyecto de investigación así como los pasos que estamos llevando a cabo para lograrlo. En particular nos centraremos en describir la simulación realizada sobre la principal arteria de Valladolid, el Paseo de Zorrilla, y describiremos cómo pretendemos adaptar una aplicación software desarrollada inicialmente para agilizar la formación de VE dinámicas a la gestión del tráfico.

Esta herramienta, denominada DVEBreeder, hace uso de dos tecnologías procedentes del campo de la inteligencia artificial (AI, *Artificial Intelligence*) como son los sistemas

multiagentes (MAS, *Multi-Agent System*) y los sistemas expertos (ES, *Expert System*). Su combinación es totalmente adecuada ya que, por un lado, los MAS permiten afrontar eficientemente los problemas de interacción en entornos distribuidos, como el que constituye la gestión del tráfico, mientras que el ES dota a los agentes que componen el MAS de un módulo de decisión que les hace comportarse de forma similar a como lo haría una persona experta en este dominio de aplicación, con la ventaja que en estos sistemas la respuesta es inmediata.

II. LA CIUDAD INTELIGENTE Y LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTES

Las últimas décadas han sido testigos de un incremento vertiginoso de las poblaciones urbanas a nivel mundial, y la previsión es que esta tendencia se mantenga. Los países en vías de desarrollo impulsan el crecimiento urbano y existen cada vez más megaciudades en las que viven millones de personas.

Pero este crecimiento de las ciudades plantea enormes retos y oportunidades a sus líderes políticos. Dada la escasez de recursos, sobre todo económicos, se precisa trabajar en la búsqueda de servicios más eficientes y orientados específicamente a los ciudadanos; surge así la posibilidad de que las ciudades sean más “inteligentes”, empleando tecnologías avanzadas para recopilar más datos y de mayor calidad, analizarlos de forma inteligente y conectarlos mediante redes más eficaces.

De este modo, multitud de ciudades han comenzado a emplear soluciones más inteligentes en ámbitos tan diversos como son el suministro de agua o el de electricidad, el tratamiento de aguas residuales, la seguridad pública, etc. Pero el campo donde más han avanzado este tipo de soluciones es, sin duda, el transporte.

Asociado al crecimiento de la población y a la mejora en las condiciones de vida, se ha producido un aumento de la demanda de transporte que ha venido acompañada de una mayor compra de vehículos de uso particular. Si bien el transporte es uno de los elementos que explican el rápido crecimiento de las urbes y del bienestar social, también es cierto que se está convirtiendo en uno de los problemas más acuciantes en la mayoría de las ciudades.

El aumento del tráfico provoca problemas de transporte como son el aumento de los atascos, la merma en la seguridad de los usuarios y el deterioro de las infraestructuras, sin olvidar el impacto negativo que producen sobre el medio ambiente y la pérdida de competitividad económica de la ciudad. El objetivo de los líderes gubernamentales ha de ser, por tanto, trabajar en la búsqueda de soluciones que den respuesta a estos problemas.

Sin embargo, no existe una solución mágica que sirva para todos los casos y situaciones, dado que la naturaleza de los problemas es diferente para cada ciudad y depende de múltiples factores, como son el *layout* de la ciudad, su grado de desarrollo, las infraestructuras de transporte existentes, etc.

Sin duda, para mejorar el flujo de vehículos y la movilidad es necesario incrementar y mejorar el uso de sistemas de transporte público masivo, promoviendo alternativas a los vehículos privados, e invertir en infraestructuras. Sin embargo, las restricciones impuestas por las limitaciones presupuestarias obligan, sobre todo en épocas de crisis, a gestionar más eficazmente la demanda y el suministro. Con este fin surgen los sistemas de transporte inteligente, que proporcionan herramientas, tecnologías y estrategias innovadoras para gestionar los sistemas de transporte y utilizar más eficazmente las infraestructuras.

No cabe duda que la mayoría de las ciudades se encuentran en las primeras fases de comprensión y materialización de todo el potencial de los ITS, pero también es cierto que a medida que estas tecnologías avancen y las ciudades ganen experiencia optimizando su valor, su adopción se extenderá rápidamente por las múltiples ventajas y beneficios que aportan.

Estos sistemas están basados en tres características fundamentales: información, comunicación e integración. La adquisición, procesamiento, integración y el suministro de la información suponen el alma de los sistemas de transporte inteligente, haciendo que las autoridades, operadores y viajeros estén mejor informados, más coordinados y facilitando la toma de decisiones más inteligentes.

Dentro de la distintas herramientas que ofrecen estos relativamente nuevos sistemas cabe destacar aquellas que se encuentran dirigidas a la gestión del tráfico y aquellas destinadas a ofrecer al viajero en cualquier momento toda la información relevante a su ruta, tanto antes de emprender el viaje como una vez que está realizando el mismo.

Algunos ejemplos de los sistemas inteligentes de transporte son los sistemas avanzados de información al viajero (ATIS, *Advance Travel Information Systems*), los sistemas avanzados de gestión del tráfico (ATMS, *Advanced Travel Management Systems*) y los sistemas de optimización del tráfico (ATOS, *Advanced Travel Optimization Systems*).

La mayor parte de estos sistemas proporcionan a los conductores y a los ingenieros la situación actual (real o simulada) del tráfico y los pronósticos para el mismo. Pueden incluso sugerir acciones para mejorar la circulación. Para obtenerlos, los investigadores han dedicado mucho trabajo a simulaciones del tráfico, especialmente al desarrollo de simuladores microscópicos exactos.

Las tecnologías ITS también ofrecen la posibilidad de crear nuevos servicios en torno a la información, como planificación de trayectos y alertas de tráfico previos al desplazamiento, así como diferentes modelos de gestión y tarificación flexible en función del uso, las emisiones o las horas punta.

Pero para aprovechar el verdadero potencial de los ITS es preciso pensar "a lo grande", lo que conlleva abandonar el uso de soluciones parciales asociadas a un funcionamiento monomodal y poner en práctica amplias estrategias que involucren servicios sofisticados de transporte multimodal e integrado.

III. GESTIÓN DEL TRÁFICO

La gestión del tráfico constituye uno de los aspectos fundamentales a tener en cuenta dentro de la regulación del tráfico interurbano y urbano. A nivel de España existen los Centros de Gestión de Tráfico (CGT), que son los encargados de la regulación interurbana, mientras que la regulación urbana generalmente la realizan centros específicos de cada ciudad.

A modo de resumen, los CGT son las unidades responsables de las tareas de control y supervisión en la circulación, así como de la asistencia e información a los usuarios de la vía. Estos centros también centralizan la recepción de todos aquellos datos e informaciones generados, a partir de los cuales es posible gestionar el tráfico e informar a los usuarios aplicando las técnicas, procedimientos, equipos y sistemas apropiados. En la actualidad, la Dirección General de Tráfico tiene en servicio los centros ubicados en Madrid, Valencia, Málaga, Sevilla, Zaragoza, Valladolid y La Coruña.

Los CGT tienen como objetivos reducir la siniestralidad en carretera, gestionar y controlar el tráfico interurbano y proporcionar información sobre el desarrollo de la circulación en tiempo presente a los usuarios de la red viaria. Además, cabe destacar que también promueven activamente la investigación en este campo, la realización de estudios en materia de seguridad vial y el desarrollo de aplicaciones telemáticas de tráfico.

Por lo que se refiere a la regulación del tráfico urbano, nos vamos a centrar en la población objeto de estudio, la ciudad de Valladolid.

1. CARACTERÍSTICAS DE LA REGULACIÓN DEL TRÁFICO EN VALLADOLID

Esta localidad castellano-leonesa posee un tamaño medio con una población ligeramente superior a los 310.000 habitantes, lo que la convierte en una ciudad que no muestra las grandes complicaciones en materia de movilidad que sí que presentan otras ciudades de mayor tamaño.

Cuenta con varias arterias principales en el entorno urbano, como lo son la Avenida de Salamanca, Avenida de Burgos, Paseo de Isabel la Católica, Paseo del Arco de Ladrillo, Avenida de Gijón, Avenida de Segovia, Paseo de Farnesio, Calle San Isidro o la que quizás representa el eje más importante que presenta la ciudad: el Paseo de Zorrilla. Fuera de estas arterias principales se sitúan calles de menor entidad, polígonos, barrios y demás.

Como circunvalaciones, Valladolid cuenta con tres cinturones: el primero está formado por el Paseo de Juan Carlos I, la Avenida de Salamanca y la Avenida de Burgos, el segundo es la denominado VA-20 o Ronda Este de Valladolid; y el tercer cinturón es la Ronda Exterior VA-30 que actualmente está en construcción con cerca de 9 kilómetros operativos. En la Figura 1 se puede observar un mapa general de la ciudad de Valladolid.



Figura 1. Vista general de la ciudad de Valladolid.

El organismo encargado de gestionar el tráfico en Valladolid es el propio Ayuntamiento, aunque la Policía Local también participa de forma activa colaborando con el Ayuntamiento. En Valladolid predomina en gran parte una regulación semafórica de los cruces de las distintas calles, arterias y de los dos cinturones interiores de la ciudad. Dado que la regulación semafórica es muy compleja y está muy sujeta a la afluencia de tráfico de las distintas vías, se hace necesaria la existencia de sistemas de monitorización del tráfico.

Entre los sistemas de monitorización utilizados en la ciudad de Valladolid encontramos los sistemas electromagnéticos de detección que, sin duda, son los sistemas más empleados. Tienen carácter permanente y se encuentran ubicados a lo largo de todas las vías principales y aledañas de la ciudad. En el caso de Valladolid, proporcionan el aforo de vehículos cada 15 minutos, aunque sin distinguir ni el tipo de vehículo que lo atraviesa, la velocidad, el instante de llegada o el tiempo de paso entre vehículos. Cabe destacar que estos sistemas son los que nos han suministrado la información principal para construir el modelo de simulación del flujo de vehículos, ya que son los que existen en el tramo objeto de estudio.

Además de las espiras, en Valladolid también se dispone de otros sistemas de monitorización como son los tubos neumáticos, las estaciones de visión artificial y los aforadores de composición del tráfico. Los primeros proporcionan la misma información que las espiras con la particularidad de que pueden utilizarse de manera provisional para realizar la monitorización puntual de un tramo concreto.

Por lo que se refiere a las estaciones de visión artificial, en Valladolid se encuentran ubicados en puntos estratégicos, problemáticos y de gran afluencia de tráfico, como puede ser la rotonda que existe en la confluencia del paseo Zorrilla y la Avenida Juan de Austria. Por último, los aforadores de composición del tráfico son capaces de realizar una composición de tráfico en un momento o tramo de tiempo determinado, distinguiendo el tipo de vehículo que pasa en cada momento, además de medir el instante de paso de los vehículos y el tiempo de paso entre vehículos. Éste tipo de aforadores están colocados en los principales accesos y rondas de circunvalación de Valladolid.

En cuanto a los sistemas de regulación del tráfico, en Valladolid, como en la mayoría de las ciudades, no se realiza utilizando siempre los mismos métodos. Entre los distintos elementos de regulación del tráfico que nos podemos encontrar tenemos los elementos pasivos, como pueden ser stops, cedas el paso, glorietas, etc., y elementos de regulación activa, como son los semáforos.

Los sistemas de regulación pasiva tienen la ventaja de que no consumen energía eléctrica, por lo que son más respetuosas con el medio ambiente, son autorreguladas, por lo que no hace falta una gestión específica una vez implantadas, y agilizan el tráfico en caso de que la afluencia de vehículos no sea muy elevada. Como principal inconveniente encontramos que no pueden realizar una gestión dinámica del tráfico.

Los sistemas de regulación activa, por su parte, sí permiten realizar una gestión dinámica y automatizada de los flujos de tráfico. Se puede dar prioridad a diferentes flujos de tráfico dependiendo de distintos factores como pueden ser la afluencia de los vehículos, la velocidad, el tráfico de peatones, días festivos, hora del día etc. Los sistemas de regulación activa también permiten gestionar de forma activa los flujos de peatones o carriles bici y adaptarlos a las condiciones del tráfico rodado.

Como inconvenientes se pueden citar algunos como el consumo energético que se produce al utilizar estos sistemas, que no es nada despreciable. También cabe destacar los problemas de regulación que se producen en caso de falta de energía eléctrica, ya que en ciertas ocasiones, y dependiendo del tipo de intersecciones con las que se cuenten, los problemas pueden ser bastante importantes.

La ciudad de Valladolid es un claro ejemplo de la implantación de diferentes métodos de regulación del tráfico a lo largo de la ciudad, aunque existe un claro predominio de los sistemas activos. De hecho, los semáforos son un elemento muy común tanto en la mayoría de las vías del centro de la ciudad como en las vías principales del extrarradio de la ciudad (incluida la Ronda de Circunvalación VA-20)³. Las intersecciones con vías principales en las calles del centro de la ciudad están solucionadas mediante cruces o raquetas (rotondas partidas) reguladas también semafóricamente.

³ Los sistemas pasivos como las rotondas, intersecciones reguladas mediante Stops y Cedas el Paso son más habituales en calles de menor entidad y afluencia de tráfico de barrios y zonas más externas.

Cada cruce o tramo consta de un número determinado de grupos semafóricos. Dichos grupos semafóricos deben estar correctamente sincronizados y coordinados entre sí. De la coordinación de los grupos semafóricos de un cruce o tramo determinado se encargan los reguladores: en la ciudad de Valladolid existen aproximadamente 230 reguladores semafóricos.

Dichos reguladores pueden estar aislados, si no tiene la necesidad de mantener una sincronía con otros reguladores colindantes, o bien coordinados, cuando sea preciso una sincronización con otros reguladores. Dentro de los coordinados encontramos reguladores de tiempos fijos, en los que los tiempos son establecidos directamente desde la central de gestión, o bien semiactuados, en los que los reguladores interaccionan entre sí. Un ejemplo de reguladores semiactuados son los que hay en las largas avenidas, en las que un regulador envía una señal al siguiente en el momento de ponerse en verde, para que este último haga lo mismo en un periodo de tiempo determinado.

Dado el gran número de reguladores existentes, en la ciudad de Valladolid se emplean nueve centrales de zona que se encargan de la coordinación de los reguladores de un área determinada, y que están conectados directamente al centro de control del tráfico. Precisamente, éste es el último escalón en la gestión del tráfico, el Centro de Gestión.

Como es lógico, siempre que existe una red de regulación semafórica debe existir una coordinación entre los distintos elementos y una entidad que se encargue de su gestión y gobierno. En el caso de Valladolid, la gestión de la red semafórica se realiza desde el centro de gestión situado en el edificio de la policía municipal, en la calle de la Victoria nº4.

En dicho centro se realizan las labores de vigilancia del tráfico, gestión y regulación del tráfico rodado, además de la gestión y detección de anomalías y averías en las redes semafóricas. El Centro de Gestión está integrado dentro del edificio de la policía municipal lo que le permite realizar otras labores relacionadas con la gestión de multas y sanciones o el control del servicio de recogida de vehículos, entre otras muchas.

2. EL MÉTODO ACTUAL DE GESTIÓN DEL TRÁFICO EN VALLADOLID

La base para confeccionar un modelo de gestión de tráfico es la toma de datos. En el caso de Valladolid la recolección de datos se realiza por medio de los métodos de medida explicados anteriormente. Una vez se dispone de dichos datos, éstos se analizan para extraer conclusiones sobre las necesidades de regulación que tiene cada una de las zonas de la ciudad. En base a dichas conclusiones se confeccionan los planes de base de gestión semafórica que serán aplicados posteriormente.

Como es obvio, las condiciones del tráfico tienen una variabilidad estacional bastante acusada, una variabilidad diaria a lo largo de la semana y una variabilidad horaria a lo largo del día. Pero también existen situaciones que pueden afectar, no sólo a la intensidad de los vehículos, sino a los flujos de tráfico: las obras, los periodos de entrada y salida a los colegios, variaciones en el transporte público, eventos deportivos,

etc. Para mejorar la fluidez del tráfico, la gestión de la red semafórica también debería cambiar para responder a todas estas variaciones y a las necesidades que vayan surgiendo.

Para ello, el Centro de Gestión de Valladolid parte de un plan base de tiempos que responde a las necesidades más comunes del tráfico de la ciudad. Teniendo en cuenta las diversas incidencias mencionadas anteriormente se introducen variaciones sobre dicho plan, lo que resulta en unos planes de variaciones que, obviamente, son adecuados para unas necesidades concretas. Estos planes de variaciones se aplican de manera programada en ciertos momentos (como por ejemplo en las horas de entrada y salida a los centros educativos) o bien se aplican de manera manual⁴ en otras situaciones menos comunes.

Por último, resulta interesante destacar que desde el servicio de Movilidad del Ayuntamiento de Valladolid se llevó a cabo un proyecto de selección automática de planes en función de las condiciones del tráfico en tiempo real. Dicho proyecto se llevó a cabo en el barrio de Parquesol. Su funcionamiento, a grandes rasgos, consistía en una optimización de los flujos de tráfico en tiempo real y sin intervención humana, basándose en datos procedentes de los sistemas de medición (en éste caso espiras electromagnéticas). Teniendo en cuenta los itinerarios principales, la intensidad de vehículos en cada periodo de tiempo e intentando mejorar las líneas verdes, se realizaba un ajuste constante de los ciclos de los diferentes semáforos.

Éste proyecto fue finalmente aparcado debido, en gran parte, a las problemáticas con la colocación de los sistemas de medición, que no permitían conocer una información de la acumulación de los coches en los semáforos en rojo todo lo realista que debiera ser. Otra de las razones por las que el proyecto fue abandonado fueron las quejas de los vecinos de la zona dado que, al realizarse un ajuste continuo de los ciclos de los semáforos, no podían prever cómo les iban a afectar los semáforos en un trayecto determinado.

IV. OBJETIVO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Como se deduce de los apartados anteriores, la organización del tráfico puede ser una tarea muy compleja, sobre todo en determinadas calles con un elevado número de intersecciones y una gran afluencia de vehículos. En estos casos, el uso de elementos pasivos como glorietas o rotondas no solucionan los problemas y se hace necesario recurrir a sistemas activos como los grupos semafóricos.

Surge así la necesidad de coordinar un gran número de semáforos de forma que permitan agilizar el flujo de vehículos, independientemente de la hora, del día de la

⁴ En situaciones en las que se produce una intensidad de vehículos muy grande en un flujo de tráfico concreto (ya sea por accidentes, inundaciones, grandes obras,...), existe la posibilidad de realizar un control manual y en tiempo real de los distintos cruces, estableciendo los distintos tiempos de la manera que el operador humano vea oportuna. Dado que el manejo manual de un cruce puede ocasionar conflictos con otros colindantes, tan sólo se emplea de forma muy esporádica.

semana o de la estación en la que nos encontremos. Además, es preciso que pueda responder ágilmente a cualquier variación producida tanto por acontecimientos puntuales como son los accidentes, las obras, los eventos deportivos,..., como por eventos periódicos.

Pese a que no tiene un tamaño excesivamente grande, la ciudad de Valladolid no es una excepción a este problema y presenta las mismas necesidades que las grandes ciudades. Un ejemplo de ello lo encontramos en la principal arteria vallisoletana, el Paseo de Zorrilla. En toda su extensión, y especialmente en el tramo que pretendemos estudiar, cuenta mayoritariamente con una regulación de tipo semafórico, lo que ofrece la posibilidad de regular de una manera realmente versátil los flujos de tráfico.

Mediante variaciones en la gestión de los grupos semafóricos se puede favorecer el tráfico de ciertos itinerarios bajo ciertas condiciones, lo cual permite solucionar los problemas que se puedan originar en las distintas calles de una manera factible. Mediante estas variaciones también se puede influir sobre otros factores como pueden ser la velocidad de los vehículos, el transporte público o los peatones que cruzan las distintas vías.

Como se puede suponer, la gestión de una red semafórica no es tarea fácil y se torna más compleja a medida que la red se extiende. Una gestión ineficiente puede provocar que el tráfico se convierta en un auténtico suplicio para los ciudadanos; pero bien gestionada, puede dar como resultado una ciudad mucho más transitable, limpia y menos ruidosa en lo que a vehículos se refiere.

Como se ha comentado, en la actualidad la gestión de la red vallisoletana se realiza de manera manual partiendo de diversos estudios de intensidad de vehículos, estudios de líneas verdes, estudio de itinerarios principales y otros métodos. Una vez realizados estos estudios se establecen los planes de tiempos de los semáforos para las circunstancias más habituales y variaciones de éstos para situaciones concretas.

Sin embargo, esta forma de actuar es bastante rígida, de modo que la red de semáforos no se adapta realmente a los flujos de vehículos, cuyas características varían constantemente, tal y como se ha discutido. Lo ideal sería poder lograr que la red semafórica fuese capaz de adaptarse ágil y dinámicamente a las condiciones de los flujos, de forma que cada semáforo pudiese regular sus ciclos de tiempo de forma coordinada con el resto de semáforos. De este modo, podríamos ser capaces de configurar de forma dinámica redes de semáforos para, por ejemplo, agilizar el flujo en vías congestionadas, o para priorizar rutas alternativas o de escape como respuesta a un accidente de tráfico, una obra, un evento cultural, etc.

Si queremos ser lo más eficientes posibles, debe ser el propio sistema el que se autogestione y se adapte dinámicamente, por lo que es preciso una cooperación entre los elementos semafóricos y los mecanismos de medición que nos proporcionan información real y dinámica de los flujos de tráfico. Esta cooperación plantea, sin duda alguna, problemas y exigencias difíciles de solventar si no se tiene en cuenta las ITC.

El problema de coordinación y cooperación que hemos presentado muestra un gran número de similitudes con los retos a los que deben enfrentarse las empresas que pretenden dar una respuesta ágil y eficiente a las necesidades de sus clientes. Dado el elevado grado de competencia y dinamismo actuales, las empresas se ven obligadas a colaborar entre sí para sobrevivir. Esta necesidad de cooperación ha conducido al nacimiento del paradigma de empresa virtual dinámica.

Trasladándonos a nuestro problema, partimos de la necesidad de agilizar la respuesta a las situaciones variables y estocásticas asociadas al tráfico, lo que nos hace considerar la formación de Redes de Tráfico Virtuales y Dinámicas (DVTN, *Dynamic Virtual Traffic Networks*) y, por tanto, a adaptar algunas de las ideas y herramientas ITC construidas ad hoc para las empresas virtuales dinámicas. Aquí es donde podemos englobar parte del trabajo que se está desarrollando y que se empieza a presentar a lo largo de esta comunicación.

La construcción de esta solución exige una serie de pasos, algunos de los cuales describimos brevemente en esta publicación. A grandes rasgos, el desarrollo comienza, como en cualquier investigación, con la realización de un estudio del arte para conocer la problemática y las soluciones planteadas hasta el momento. El siguiente paso ha consistido en la construcción de un modelo de simulación del tramo principal del Paseo de Zorrilla empleando el simulador Witness. La construcción de este modelo nos ha permitido conocer mejor el comportamiento del tráfico en esta parte de la ciudad, pero también constituye el punto de partida para la realización de múltiples experimentos que permitan estudiar distintas políticas de control o conocer el comportamiento del tráfico en situaciones concretas, la evolución de la contaminación (p.e., por la incorporación del vehículo eléctrico), etc.

La etapa posterior consistirá en la construcción de una herramienta software capaz de dar respuesta al problema plantado de forma ágil y eficaz. Para ello, trabajaremos en la adaptación de una solución software desarrollada inicialmente para agilizar la formación de VE dinámicas. Tal y como se ha comentado, esta herramienta, denominada DVEBreeder, hace uso de dos tecnologías procedentes del campo de la inteligencia artificial: los sistemas multiagentes y los sistemas expertos.

Su combinación es totalmente adecuada ya que, por un lado, los MAS permiten afrontar eficientemente los problemas de interacción en entornos distribuidos, como el que constituye el trabajo en red, mientras que el ES dota a los agentes que componen el MAS de un módulo de decisión que les hace comportarse de forma similar a como lo haría una persona experta en este dominio de aplicación.

A partir de la herramienta construida, el siguiente paso consistirá en realizar simulaciones con los agentes inteligentes a fin de conocer si la solución propuesta presenta ventajas significativas respecto a la solución implantada actualmente. Finalmente, y en el caso de que la nueva solución suponga una mejora significativa, un estudio económico de su implantación permitirá conocer la viabilidad real de la solución.

V. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DEL PASEO DE ZORRILLA

Las simulaciones de tráfico pueden tener multitud de utilidades y fines. Sirven para ayudar a conocer qué ocurrirá, por ejemplo, en una determinada red de carreteras si se cambia la configuración de los semáforos o la distribución de las vías; ayudan a crear y configurar nuevas áreas urbanas con distintos elementos de circulación reales de manera que se pueda conocer con antelación el comportamiento de los vehículos; etc.

Para un ingeniero de transporte, un software que permita la simulación del tráfico es una importante herramienta de ayuda para evaluar una red. Permite a los usuarios utilizar escenarios modelados de una manera rápida y rentable, sin interrumpir el tránsito de vehículos de una red existente y sin el riesgo potencial sobre la seguridad pública que puede conllevar implantar un modelo en la realidad, por no mencionar el posible caos que puede ocasionar llevar a la práctica un modelo no tan adecuado como se preveía.

Por ello, en los últimos años, y en respuesta a la demanda del mercado de este tipo de productos, se han desarrollado varias soluciones en este campo, tanto privativas como de software libre, como es el caso de AIMSUN, SUMO, TransModeler, SimTraffic, Transyt, Linsig,... Sin embargo, en este proyecto hemos optado por un simulador de propósito más general, como es el simulador Witness (Figura 2), con el fin de asegurar una mayor flexibilidad y operatividad ante futuros experimentos y desarrollos.

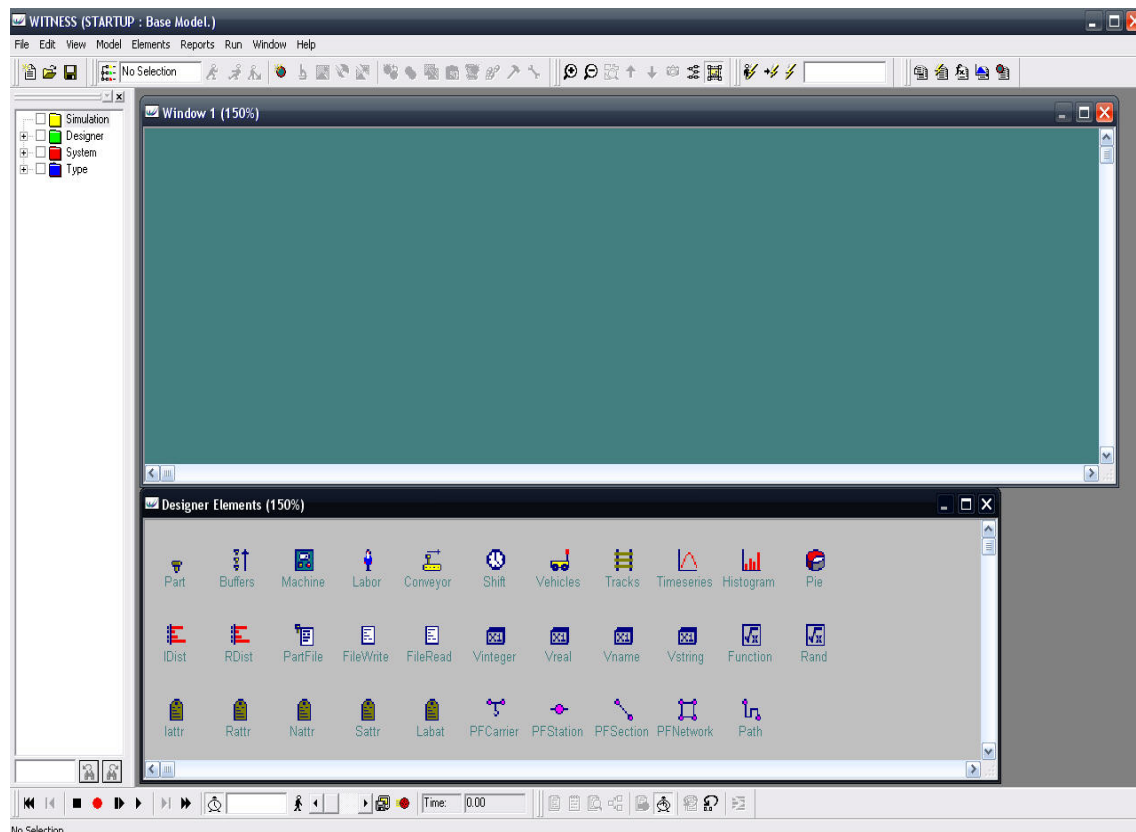


Figura 2. Ventana principal del simulador empleado, Witness Power with Ease 3.0.

35

El Paseo de Zorrilla consta de dos flujos principales de tráfico, uno en dirección a Covaresa y otro en dirección al centro, que discurren por las vías centrales del paseo. En la mayor parte de su extensión, cada flujo principal va a estar compuesto por tres carriles que interaccionan con las vías de servicio y con algunas vías adyacentes mediante distintas entradas y salidas. Como flujos secundarios tendremos, en primer lugar, las vías de servicio que discurren de forma paralela a los flujos principales; éstas tienen un carácter discontinuo e interaccionarán con los flujos principales y con gran parte de las vías adyacentes. En segundo lugar encontramos los flujos entrantes, salientes o los adyacentes al Paseo Zorrilla⁵.

2. FORMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

La formulación del modelo comienza con la captura de los aspectos relevantes del sistema real. Éstos, obviamente, dependen del cometido y fin de la investigación. En nuestro caso, el sistema va a estar compuesto por los diferentes carriles, los semáforos con sus correspondientes fases, así como los flujos de coches.

Por carril entenderemos el itinerario que puede seguir un vehículo a lo largo del modelo, teniendo como origen una fuente de vehículos, un semáforo u otro carril, y como destino un semáforo, un carril o bien una salida del modelo. En la Figura 4 se representan distintos ejemplos de flujos existentes en el tramo de estudio (flujos principales, interacción entre flujos principales y secundarios, cruces,...).

Dentro del modelo, los coches se van a mover entre los diferentes carriles siguiendo cada uno de ellos una ruta alternativa. La transición entre carriles se puede regir a través de los ciclos semafóricos o a través de una conexión directa entre los propios carriles. Respecto a los semáforos, éstos se componen de ciclos (véase la Figura 5) de 100 segundos dentro de los cuales se establece un número alternativo de fases diferentes: la fase verde permite circular libremente a los vehículos, mientras que las fases roja y ámbar van a impedir la circulación, provocando la acumulación de vehículos.

Un aspecto clave en la formalización y construcción del modelo es la recogida de datos. Estos datos se han obtenido por medio de registros históricos, ensayos y mediciones realizadas en el sistema real, y posteriormente han sido procesados adecuadamente para darles el formato exigido por el modelo.

Para la definición correcta del modelo se han necesitado los datos correspondientes a los semáforos (como por ejemplo los ciclos de cada uno de ellos), los coches (p.e., el número de vehículos que circulan por los carriles del Paseo Zorrilla, velocidades, intensidad,...), distancias geográficas, etc. Cabe destacar que gran parte de estos datos han sido facilitados por el Servicio de Movilidad del Excelentísimo Ayuntamiento de Valladolid, a quienes expresamos nuestra gratitud, en especial a D. Roberto Riol, Jefe de Tráfico de Excmo. Ayuntamiento de Valladolid.

⁵ Todos estos flujos van a estar gobernados por sus correspondientes reguladores semafóricos, teniendo un total de 9, según información del Servicio de Movilidad del Ayuntamiento de Valladolid.

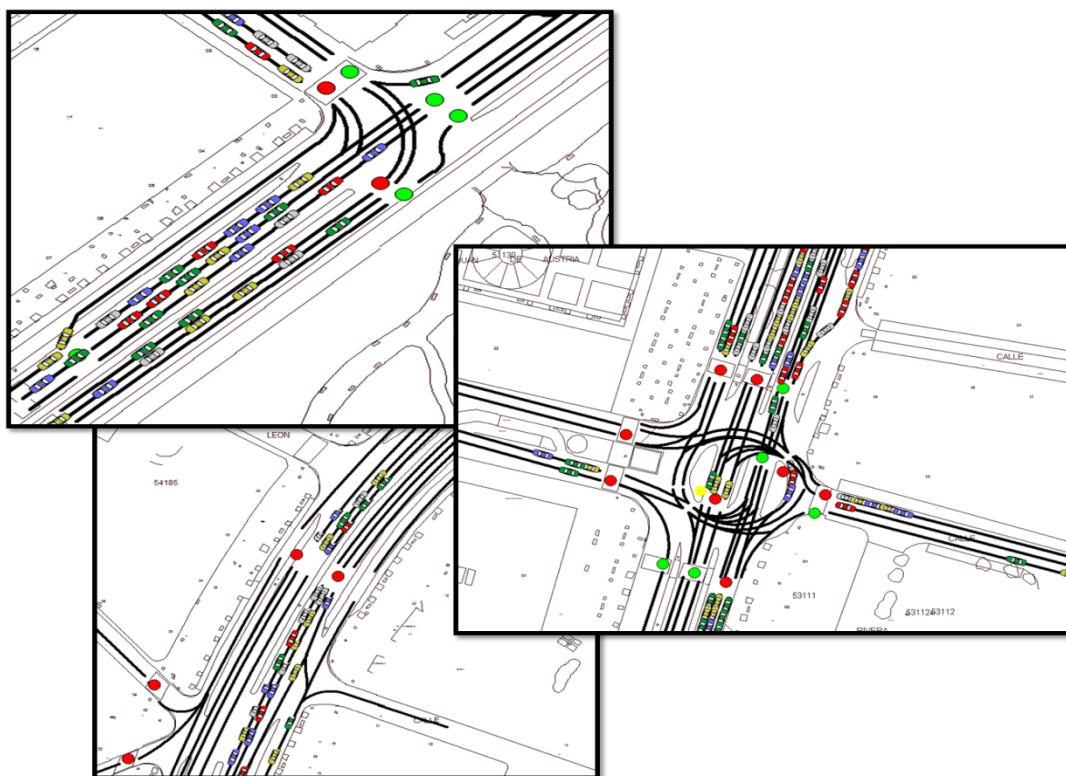


Figura 4. Diversos ejemplos de flujos de vehículos en el tramo de estudio.

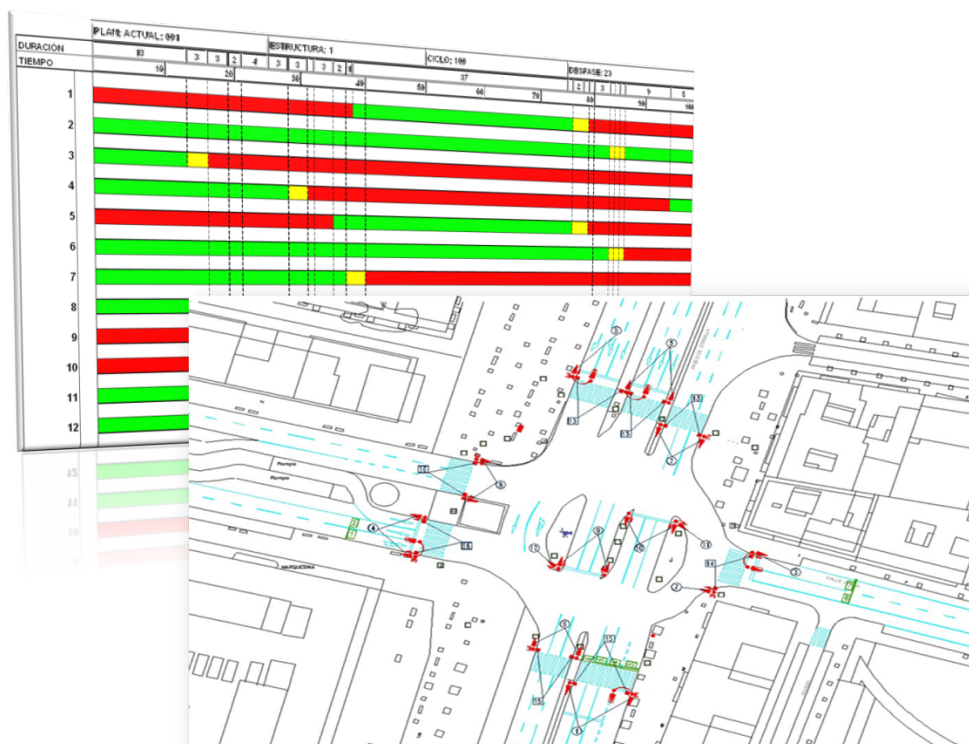


Figura 5. Ejemplo de los ciclos semafóricos empleados en uno de los cruces del Paseo.

Una vez analizados los correspondientes ciclos semafóricos de cada cruce del Paseo Zorrilla es preciso conocer, entre otros datos, el número de vehículos que circulan. Esta información se puede determinar gracias a las espiras colocadas estratégicamente a lo largo del Paseo (en la Figura 5 se pueden apreciar dibujadas en forma de rectángulos verdes). El Ayuntamiento nos ha facilitado los datos correspondientes a los martes de octubre y noviembre de 2012: los primeros se han utilizado para construir el modelo mientras que los datos de noviembre se han empleado, como veremos, para validarlo.

El siguiente paso consistió en la construcción de un modelo en el simulador Witness. Este paso supuso “trasladar” los elementos de nuestro modelo formal a elementos Witness. Así, por ejemplo, para simular el comportamiento de los vehículos que entrarán en el modelo y que más tarde circularán por él se ha utilizado el elemento *part* de Witness. Para los semáforos se ha empleado el elemento *machine* de Witness, mientras que para definir los diferentes periodos de cada semáforo se ha utilizado el elemento *shift*; etc.

Cabe destacar que para representar los carriles se ha empleado el elemento *conveyor*. Estos elementos permiten simular el comportamiento de los coches a lo largo de todo el Paseo Zorrilla, y nos permiten lograr una representación muy realista de la calzada. Todos y cada uno de los elementos del modelo han tenido que ser definidos y configurados, introduciendo las características relacionadas tanto con su comportamiento como las asociadas a su representación gráfica. En la Figura 6 se puede apreciar algunas de las ventanas empleadas para tales acciones.

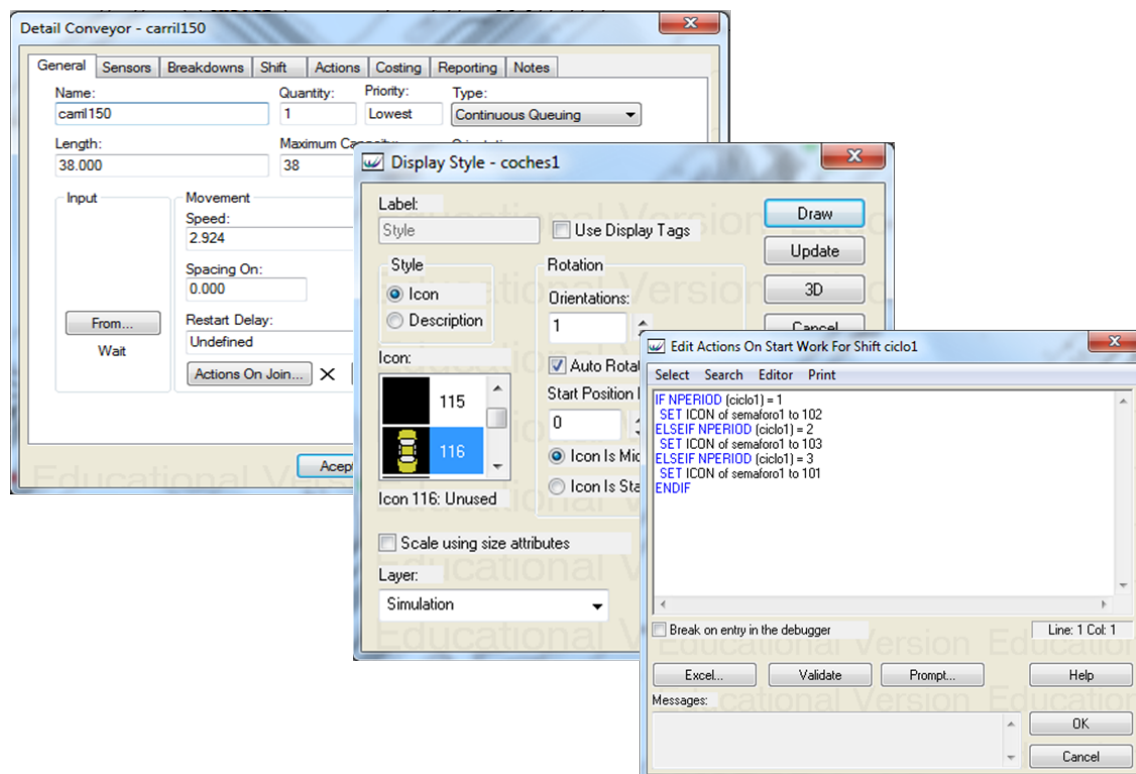


Figura 6. Múltiples ventanas de configuración de los elementos del modelo.

Tras la construcción del modelo vino la fase de verificación a fin de comprobar que la solución informática construida se comportaba tal y como se había programado. Este proceso de verificación dio paso a una de las etapas clave para dotar de fiabilidad y confianza al trabajo realizado, la etapa de validación. La validación consiste en determinar si el modelo de simulación creado es una representación exacta del sistema real en estudio. Si el modelo es válido, entonces las decisiones tomadas a partir de dicho modelo deberían ser similares a las que se tomarían al experimentar físicamente con el sistema.

La validación en el presente modelo se ha realizado para todas las espiras que se sitúan a lo largo del Paseo Zorrilla, observándose una gran concordancia entre los datos reales y simulados, tal y como puede observarse en la Figura 7.

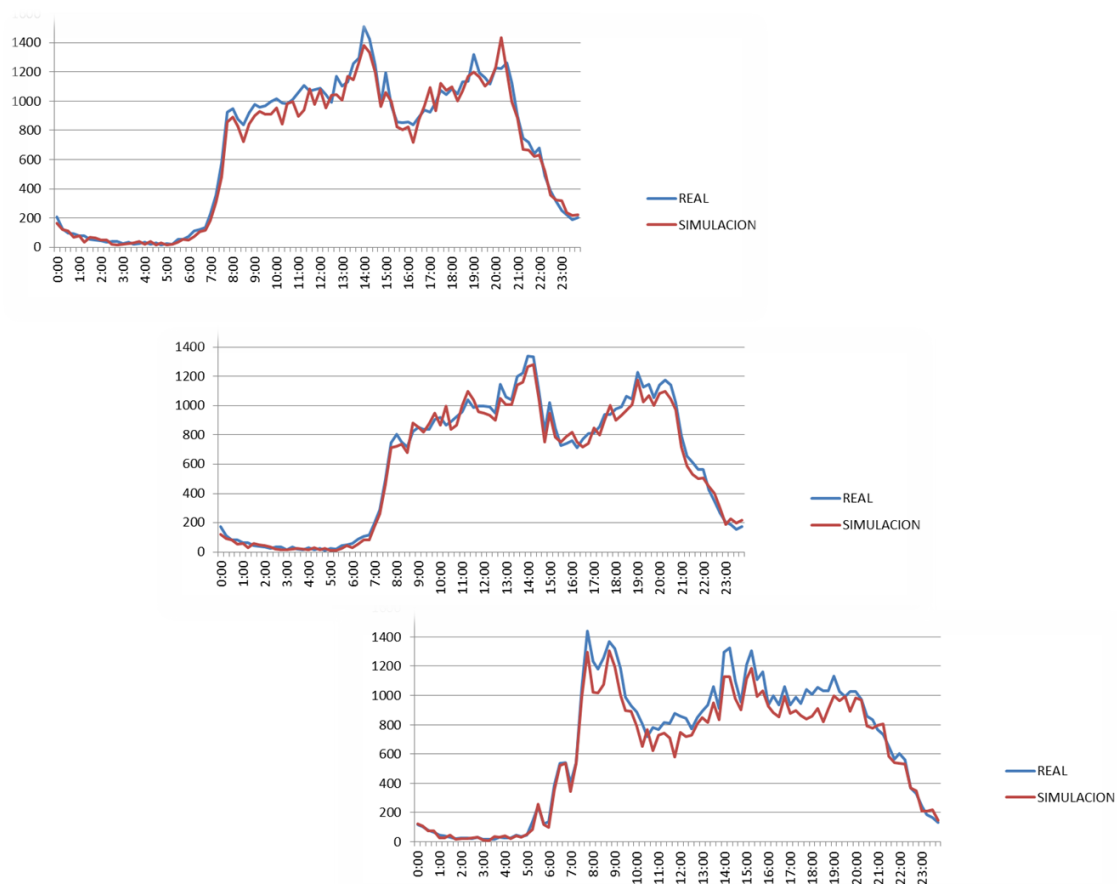


Figura 7. Algunas comparativas gráficas de las espiras tras el proceso de validación.

Como cabría esperarse, dada la gran variabilidad asociada a los flujos de tráfico (recordemos que los datos para la validación pertenecen a un mes distinto a los empleados para la construcción del modelo), en los análisis comparativos que se han realizado no existe una equivalencia exacta entre los datos simulados y los datos reales. No obstante, podemos afirmar que los resultados obtenidos para las espiras permiten considerar el modelo como completamente válido y, por lo tanto, apto para poder experimentar con él.

VI. CONSTRUYENDO UNA SOLUCIÓN A LA GESTIÓN DEL TRÁFICO

Como se ha comentado previamente, el objetivo de nuestra investigación consiste en suministrar una herramienta informática capaz de lograr una gestión ágil, eficaz y dinámica del tráfico, empleando mecanismos de regulación activa y la información en tiempo real suministrada por los sistemas de medición. Para hacerlo, partiremos de una herramienta ya creada para otro propósito, DVEBreeder, dadas las múltiples similitudes existentes entre nuestro problema y las necesidades a las que da respuesta dicha aplicación software. La solución que pretendemos construir combinará, al igual que su precursora, la tecnología multi-agente con los sistemas expertos.

1. JUSTIFICACIÓN DEL USO DE SISTEMAS MULTI-AGENTE Y SISTEMAS EXPERTOS

Los orígenes de la tecnología de agentes se enmarcan dentro del campo de la Inteligencia Artificial Distribuida (DAI, *Distributed Artificial Intelligence*), dedicada al estudio de las técnicas necesarias para la coordinación y distribución del conocimiento (Iglesias, 1998). Con el paso del tiempo, la proliferación de los ordenadores personales y el auge de las autopistas de información, la idea de “agente” se ha convertido en uno de los temas de actualidad (Corchado y Molina, 2002)

Un agente software es una entidad informática que actúa de forma flexible, dentro de un entorno, con el propósito de cumplir unos objetivos. Se caracteriza principalmente por ser autónomo, reactivo, proactivo y por estar dotado de habilidades sociales, lo que le permite la interacción con otros agentes y con su entorno gracias al intercambio de mensajes que hacen uso de un lenguaje de comunicación de agentes.

La característica de sociabilidad de los agentes software hace de ellos un concepto muy interesante para desarrollar sistemas informáticos distribuidos donde varios agentes interactúan entre sí y con el entorno. Cada uno de estos agentes tiene la capacidad de resolver una parte específica del problema, de forma que juntos pueden alcanzar la funcionalidad deseada operando de forma asíncrona y sin un sistema de control global. A estas organizaciones se les denomina sistemas multiagente.

Existe muchas características en el dominio de la gestión del tráfico mediante grupos semafóricos que la hacen un área de aplicación adecuada para los MAS:

- Los agentes software autónomos, adaptativos y cooperativos son adecuados para aquellos dominios que requieren una constante adaptación a entornos distribuidos y/o a demandas cambiantes, como es el caso de la gestión del tráfico.
- Una red semafórica está formada por componentes autónomos, heterogéneos y distribuidos, una situación que se puede trasladar fácilmente a un sistema multiagente.
- Los MAS abordan, entre otras cuestiones, la coordinación y resolución de problemas distribuidos, aspectos críticos en la gestión del tráfico en la que se deben tener presente elementos de regulación activos y elementos de medición.

- Una red semafórica es una organización dinámica que puede requerir, en un momento dado, una reconfiguración (reemplazo de algún elemento, replanificación de la colaboración, etcétera.). En esta situación se necesita un paradigma de modelado flexible y que pueda adaptarse rápidamente a las circunstancias.
- Una red semafórica está integrada en un entorno local con el que interactúa (personas, vehículos, etc.). Precisamente, la interacción con el entorno es uno de los atributos que definen a los agentes.
- La propiedad de escalabilidad de los MAS parece particularmente adecuada para soportar redes semafóricas en las que se pueden establecer diferentes niveles de cooperación con distintos conjuntos de socios en función de las necesidades del tráfico.
- Finalmente, como los agentes suelen ser diseñados y desarrollados de forma independiente, es bastante difícil garantizar la coordinación a menos que se adopten reglas comunes (“leyes sociales” o estándares) que les permitan responder como lo haría un experto humano en este campo.

Pero, ¿cómo podemos conseguir que los agentes software se comporten, razonen y actúen como lo hacen los seres humanos?. La respuesta está en los sistemas expertos, sistemas informáticos que simulan el proceso de aprendizaje, memorización, razonamiento, comunicación, y, en consecuencia, de acción de un experto humano en cualquier rama de la ciencia (III web, 2007), lo que les permite almacenar datos y conocimiento, sacar conclusiones lógicas, tomar decisiones, comunicarse con expertos humanos, explicar el porqué de las decisiones tomadas y realizar acciones. Gracias a ellos, y en particular, a los ES basados en reglas, vamos a ser capaces de simular el razonamiento de los expertos en esa área de la gestión del tráfico.

2. LA APLICACIÓN DVEBREEDER Y SU PERSONALIZACIÓN

La aplicación DVEBreeder es una herramienta software que facilita y agiliza la formación de DVE. Como sistema multiagente, está formado por diversos agentes software, algunos de los cuales representan a las distintas entidades involucradas en la existencia de las DVE. En este sentido, la Figura 8 muestra las interfaces de algunos de los agentes de esta aplicación.

Esta herramienta afronta la formación de DVE a partir de un modelo de negocio innovador y multienfoque que permite englobar las distintas orientaciones existentes en la literatura. Además, gracias a la combinación de la tecnología multiagente y los sistemas expertos proporciona una respuesta ágil al problema de la selección de socios en estos entornos distribuidos y dinámicos. Por un lado, la comunicación entre los distintos agentes es trivial gracias a la plataforma empleada en el desarrollo del MAS, que no es otra que JADE (*Java Agent Development Environment*). Por otro, el comportamiento de los agentes es bastante similar al que pueden tener los expertos humanos; esto es posible gracias a la herramienta JESS (*Java Expert System Shell*), que permite expresar la conducta de los agentes como un conjunto de reglas.

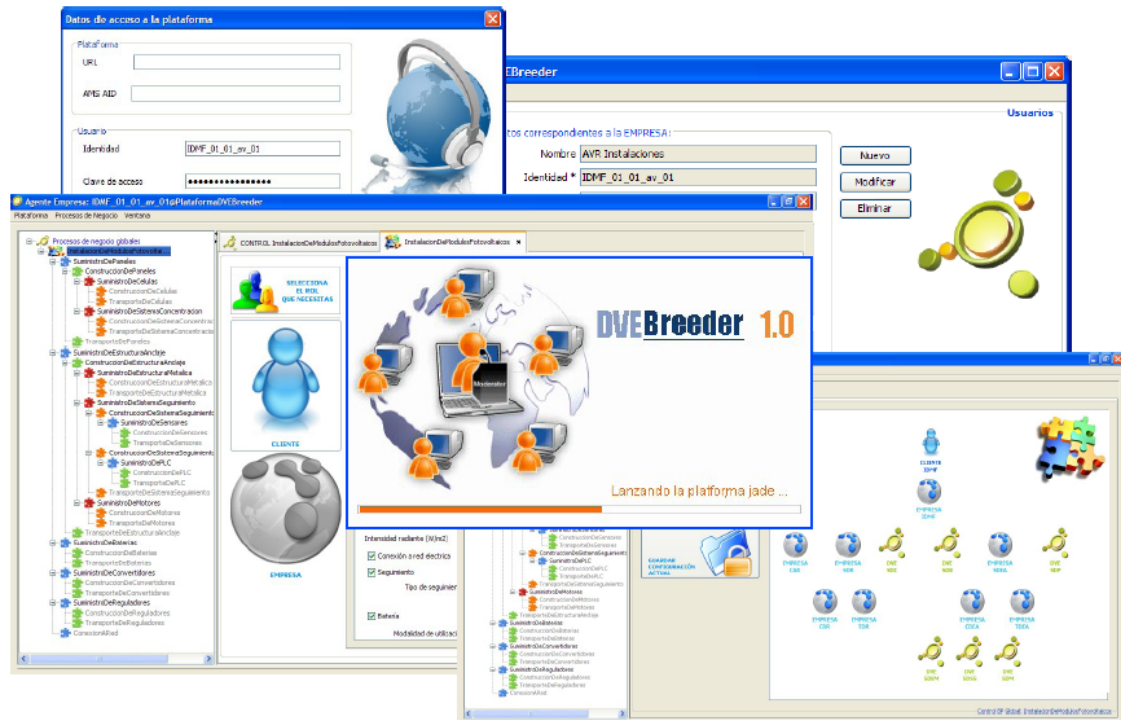


Figura 8. Algunas instantáneas de la interfaz de usuario de la plataforma DVEBreeder.

La personalización de esta herramienta constituye la parte principal de nuestro trabajo, con la que se persigue conseguir una aplicación que posibilite una selección rápida y eficiente de aquellos grupos semafóricos que deban formar parte de la respuesta a una situación atípica en la circulación. Esta personalización conlleva un gran número de actividades, algunas de cuales se enumeran a continuación:

- Definir los distintos tipos de entidades involucrados en la respuesta (concretando sus procesos esenciales), establecer las interrelaciones entre dichas entidades y modificar la ontología del dominio de aplicación.
- Concretar los tipos de agentes necesarios. Ya no existen los roles de empresa y cliente de un DVE, aunque sean conceptos que puedan extrapolarse fácilmente al caso que nos ocupa.
- Personalización de la interfaz de usuario de la aplicación. Ésta ha de ser coherente con las necesidades del nuevo problema, y con los agentes identificados.
- Modificación de la memoria de trabajo y la base de conocimiento del sistema experto. Al cambiar el dominio de aplicación también varía el conjunto de hechos que lo definen, así como las reglas que guiarán el comportamiento de los agentes (deberán establecerse, por ejemplo, las reglas que permitirán seleccionar los reguladores más apropiados en función de las características del tráfico, reglas para modificar los flujos de vehículos, etc.).

Como resumen, podría decirse que con la construcción de la nueva herramienta se pretende agilizar la respuesta ante cualquier variación importante en los flujos de vehículos mediante la optimización de los recursos existentes.

VII. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Una correcta gestión del tráfico es, sin duda, un elemento clave para asegurar el bienestar de los ciudadanos, sobre todo en las ciudades, donde la concentración de vehículos y las restricciones geográficas, presupuestarias, etc., agudizan los problemas.

En este artículo hemos descrito algunos de los aspectos clave de la investigación que estamos realizando orientada a favorecer la movilidad urbana mediante la gestión eficiente, dinámica e innovadoras de los grupos semafóricos.

En esta investigación, que como fin último persigue la implantación de un sistema experto multiagente, hacemos uso de otra herramienta clave en la ingeniería del tráfico, como es la simulación.

En este sentido, nuestra investigación futura se dirige en estas dos vías: por un lado, seguir trabajando en el desarrollo de la solución software y, por otro, avanzar en la simulación de la circulación vial en Valladolid y la realización de experimentos orientados a evaluar diferentes políticas de control y a conocer múltiples aspectos relacionados con el movimiento de vehículos dentro de la ciudad.

VIII. AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer de manera muy especial a D. Roberto Riol, Jefe de Tráfico de Excmo. Ayuntamiento de Valladolid, por el trato y la ayuda prestada. También queremos agradecer a Víctor Marina, Diego Herrero, Javier Illana y Fernando Nieto por el trabajo realizado en el proceso de simulación.

IX. NOTA BIBLIOGRÁFICA

APARICIO IZQUIERDO, F.; *Ingeniería de Tráfico*. CIE Inversiones Editoriales Dossat 2000, Madrid, 2008.

CASTILLO, E.; ALVAREZ, E.; *Expert systems. Uncertainty and Learning*. Elsevier Applied Science and Computational Mechanics Publications, London and New York, 1991.

HOUGHTON, J.; REINERS, J.; LIM, C.; *Transporte inteligente. Cómo mejorar la movilidad en las ciudades*. BM Institute for Business Value, <http://www-05.ibm.com/services/es/bcs/pdf/transporte-inteligente-como-mejorar-la-movilidad-en-las-ciudades.pdf> (20/10/2013).

SANZ ANGULO, P.; DE BENITO MARTÍN, J.J.; “Design and Implementation of a Multi-agent Framework for the Selection of Partners in Dynamic VEs”. *Leveraging Knowledge for Innovation in Collaborative Networks*, Springer, pp. 341-348, 2009. doi:10.1007/978-3-642-04568-4_36

“DIRECCIÓN GENERAL DE TRÁFICO”. <http://www.dgt.es>

“JADE - Java Agent Development Framework”. <http://jade.tilab.com/>

“JESS - the rule engine for the java platform”. <http://herzberg.ca.sandia.gov/jess/>

“LANNER”. <http://www.lanner.com>

“POLICÍA MUNICIPAL, AYUNTAMIENTO DE VALLADOLID”.
<http://www.valladolid.es/es/ayuntamiento/cartas-servicios/policia-municipal>