

# Un entorno de simulación para el diseño de herramientas de toma de decisiones en logística de transporte

D. Guimarans, J. J. Ramos, M. À. Piera

Dept. de Telecomunicacions e  
Ingeniería de Sistemas - LogiSim  
Universitat Autònoma de Barcelona  
08193 Bellaterra, Barcelona  
Daniel.Guimarans, JuanJose.Ramos,  
MiquelAngel.Piera@uab.cat

A. Guasch

Dept. de Ingeniería de Sistemas y  
Control Automático - LogiSim  
Universitat Politècnica de Catalunya  
08028 Barcelona  
Toni.Guasch@upc.cat

## Resumen

Durante los últimos años, la industria del transporte se ha visto obligada a adaptarse a las nuevas necesidades de los sistemas logísticos y de producción. El suministro *Just-In-Time* y una respuesta rápida y eficiente a las demandas de los clientes son algunas de las razones por las que la industria del transporte ha reconocido la necesidad de incorporar algunas de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación, como los sistemas de posicionamiento global (GPS), el intercambio electrónico de información (EDI) o Internet. Estas tecnologías pueden mejorar la capacidad de optimizar las operaciones de transporte, ya que proporcionan la información necesaria requerida para la toma de decisiones en tiempo real. Este artículo presenta la plataforma que se está desarrollando con el objetivo de ayudar en el diseño de herramientas de toma de decisiones en tiempo real para la industria del transporte.

## 1. Introducción

En un contexto cada vez más competitivo y globalizado de la producción industrial, basado en una economía orientada a los servicios, la posibilidad de disponer de sistemas de transporte capaces de responder eficientemente a la demanda será un factor primordial para la

competitividad de la industria y de las compañías de servicios. La logística del transporte es un ejemplo típico de entorno industrial altamente complejo donde la gestión del tiempo es crítica: se debe conseguir una asignación óptima de los recursos disponibles mientras se trabaja con peticiones, condiciones y restricciones que cambian dinámicamente i de forma continua. Usualmente, este tipo de problemas logísticos se conoce como *Problema de enrutamiento de vehículos (Vehicle Routing Problem - VRP)*, donde el objetivo es la distribución eficiente de una flota de vehículos cubriendo todas las operaciones de transporte demandadas, a la vez que se reducen los costes totales, expresados como una combinación de distancia, tiempo y coste económico.

El transporte de mercancías en las áreas metropolitanas merece especial atención, debido al gran número de deficiencias que presenta hoy en día y su correspondiente contribución a la creciente congestión del tráfico en zonas urbanas. Dicha congestión se ha convertido en un preocupación creciente en los últimos años [14]: no sólo implica una mayor cantidad de tiempo invertido durante los desplazamientos en hora punta, sino que también contribuye a la degradación de la calidad del aire. La optimización del transporte en áreas metropolitanas permite reducir los correspondientes costes asociados [11], contribuyendo a su vez a la reducción de la congestión del tráfico y a un

incremento de la fiabilidad del servicio.

Así, la elevada complejidad del VRP supone un importante objetivo para los métodos de optimización [1]. Las herramientas de ayuda a la toma de decisiones en tiempo real deben combinar la información proporcionada por los sistemas GPS, las tecnologías GIS (*Geographic Information System*), el intercambio de información on-line y algoritmos eficientes de optimización para poder afrontar las necesidades particulares de cada problema. Estas nuevas tecnologías abren la puerta al diseño de sistemas de planificación capaces de manejar correctamente toda la información disponible. Este artículo presenta una plataforma tecnológica que integra dichas tecnologías como soporte para el diseño de herramientas de toma de decisiones en tiempo real en logística de transporte. Esta plataforma tiene una arquitectura de computación distribuida orientada a poder incorporar las características propias de los diferentes problemas incluidos en la categoría VRP. Las herramientas de decisión deben reaccionar en tiempo real, especialmente en áreas metropolitanas, donde la duración de las rutas es relativamente corta y cada nueva petición de servicio debe ser atendida en un período de tiempo muy restrictivo. Asimismo, el artículo presenta una aproximación en dos fases para afrontar posibles aplicaciones reales: una fase de preproceso donde la información geográfica es tratada y reordenada según las necesidades del VRP a resolver; una fase de optimización donde se asignan los recursos disponibles y se definen las correspondientes rutas. Probar y mejorar un sistema complejo de estas características en un entorno real sería ineficiente y extremadamente caro. La plataforma presentada integra un sistema de simulación de flotas capaz de representar los problemas de transporte a diferentes niveles de complejidad. La siguiente sección introduce la arquitectura de la plataforma, donde el entorno de simulación proporciona la información de la flota de transporte. Las secciones siguientes describen el modelo del sistema y las herramientas que procesan la información geográfica requerida para la toma de decisiones, describiendo las características básicas de

los algoritmos de optimización propuestos para abordar los problemas VRP. Finalmente, se apuntan algunas conclusiones y líneas de trabajo futuras.

## 2. Arquitectura del entorno

El proyecto tiene una aproximación multidisciplinar, ya que la arquitectura integra diferentes tecnologías en cuanto a software, lenguajes de programación y sistemas operativos. La figura 1 ilustra la arquitectura del sistema. Este incluye cinco módulos principales: el *Sistema de Información Geográfica (GIS)*, el simulador de flotas, las herramientas de toma de decisiones, las aplicaciones de visualización y el sistema de localización de vehículos. El entorno ha sido diseñado como una plataforma distribuida basada en CORBA [10] para simplificar la coordinación y la comunicación entre los módulos de la aplicación. La completa modularidad de esta arquitectura también permite reemplazar módulos para responder a las necesidades de simulación o del caso de estudio de gestión de flotas: por ejemplo, el transporte de mercancías en áreas metropolitanas [2] o la gestión de los servicios de emergencia en accidentes de tráfico [5].

El Sistema de Información Geográfica gestiona toda la información estática y dinámica presente en la aplicación. La información estática está compuesta por los datos geográficos, proporcionados por una base de datos cartográfica, y la información geográfica filtrada, extraída de la anterior para generar una representación de la red de carreteras en función de las necesidades del módulo de toma de decisiones. La información dinámica está compuesta por los datos relativos a la estructura de la flota (características de los vehículos, base a la que pertenecen, estado de servicio, etc.), la posición geográfica de cada vehículo y la localización de las operaciones de transporte, así como sus características, que dependen del VRP que está siendo tratado. Por ejemplo, las restricciones de capacidad, dimensiones y de las ventanas temporales de servicio en el caso del transporte de mercancías o el número de vehículos implicados o de víctimas en la gestión

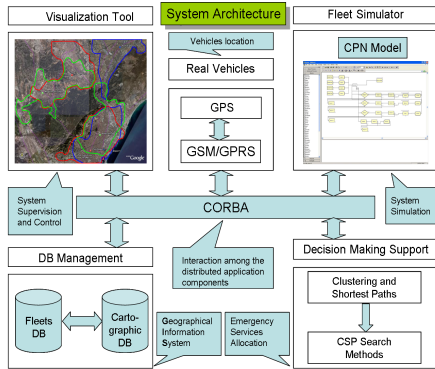


Figura 1: Arquitectura del entorno de simulación distribuido

de los servicios de emergencia.

El módulo de visualización está constituido por una aplicación gráfica donde se representan sobre un mapa los movimientos de los vehículos y las rutas configuradas. Las posiciones de los vehículos son generadas y registradas en la base de datos por el simulador de flotas durante las fases de diseño y desarrollo, mientras que su localización será proporcionada por los sistemas de posicionamiento global incorporados en los vehículos durante las operaciones en situaciones reales.

El objetivo del módulo de soporte a la toma de decisiones es la determinación de una solución factible para el problema tratado, que en todos los casos corresponde a una instancia particular del VRP. Incluidas en las técnicas de resolución se encuentran los procedimientos heurísticos y metaheurísticos, ya que ningún algoritmo exacto puede garantizar que se encuentre una solución óptima en un tiempo de cómputo razonable, debido al crecimiento exponencial de estados que presentan este tipo de problemas.

### 3. Modelo de la flota de transporte

El modelo de la flota de transporte se utiliza en la fase de desarrollo para probar la eficiencia de las rutinas de optimización diseñadas. Dicho modelo de simulación tiene dos funcio-

nes principales: la generación de las cargas de trabajo en forma de peticiones de transporte para el sistema y la simulación de las rutas asignadas por el módulo de optimización.

El modelo del sistema de transporte debe ser fácilmente adaptable a las diferentes variantes del problema de enrutado de vehículos, siendo claros ejemplos el transporte de mercancías y la gestión de los servicios de emergencia. Así, el desarrollo del modelo no ha sido guiado por una configuración particular de un problema de estas características. En su lugar, ha sido diseñado de manera que la estructura del modelo permita una parametrización adaptable en función del problema VRP que se desee tratar y sus características: recursos para el transporte, capacidad de los vehículos, número de bases existentes, particularidades de la red de transporte, etc.. De esta manera, se hace necesaria la utilización de una metodología de modelado que permita representar conjuntamente y de forma clara la estructura del sistema y su comportamiento dinámico. El formalismo de las Redes de Petri Coloreadas (*Coloured Petri Nets - CPN*) [6] ha demostrado ser una técnica de modelado muy útil para representar las características de cualquier tipo de sistema orientado a eventos discretos, ya que presenta algunas ventajas como la capacidad de concentrar y representar simultáneamente la estructura estática y el comportamiento dinámico del sistema [13], así como la disponibilidad de técnicas de análisis matemático para la validación de modelos [15]. Por otro lado, su naturaleza gráfica proporciona una representación intuitiva y fácilmente interpretable de la estructura del sistema y su comportamiento dinámico.

El modelo CPN del sistema se muestra en la figura 2. Las peticiones de transporte se generan en el instante inicial siguiendo un modelo estocástico, aunque pueden generarse nuevas peticiones durante la simulación. En la dinámica del sistema representado por este modelo se pueden distinguir claramente dos partes: la generación de las peticiones de transporte y la simulación de los movimientos de los vehículos de la flota en la red de carreteras.

El procesado de una petición de transporte



información contenida en las bases de datos GIS, obteniendo una representación de los caminos de mínimo coste entre los nodos geográficos relevantes, determinados por las peticiones de transporte, las posiciones instantáneas de los vehículos y puntos relevantes de la red de carreteras.

La aplicación de generación de caminos mínimos genera dos tipos de representación de la información GIS: un grafo de caminos mínimos, utilizado por el módulo de optimización basado en satisfacción de restricciones, y la matriz de distancias mínimas, usada en el módulo de optimización basado en modelos CPN y la exploración del correspondiente árbol de cobertura. La representación escogida depende de la instancia del problema VRP que debe abordarse.

La gestión de los servicios de emergencia [5] corresponde un problema VRP considerado como multi-depot con una flota heterogénea y ventanas temporales de servicio muy restrictivas. Con el propósito de reducir el tiempo de cómputo en la fase de optimización, la información GIS es procesada clasificando los nodos en función de la distancia y el tiempo de desplazamiento en regiones localizadas alrededor de las diferentes bases, como se muestra en la figura 3. Así, un nodo sólo es accesible por los vehículos propios de aquellas bases que minimizan el tiempo y la distancia empleados para desplazarse entre los dos puntos, creando una estructura de *clusters*. El objetivo de esta reordenación de los datos geográficos es reducir un problema VRP multi-depot a un conjunto de problemas VRP con una única base, de manera que cuando se produce un accidente sólo sea necesario resolver una de estas instancias para cada servicio de emergencia. De esta forma, los dominios de las variables de decisión quedan reducidos, mejorando el tiempo de respuesta de los algoritmos de búsqueda empleados para hallar la solución óptima. Además, junto con la reordenación de la información geográfica se lleva a cabo una tarea de cálculo de caminos mínimos dentro de cada *cluster*. Así, cuando se recibe la notificación de un accidente, se conoce una aproximación del camino mínimo entre la base y el nodo donde

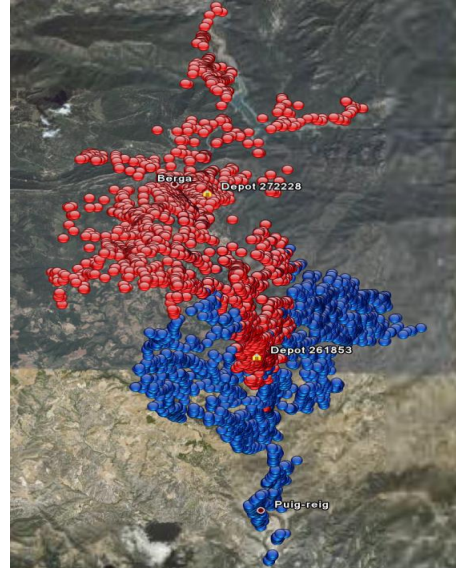


Figura 3: Ejemplo de dos clusters en una zona rural. Se puede apreciar la distribución de los nodos seleccionados alrededor de las respectivas bases.

se ha producido el siniestro, consiguiendo una importante reducción del tiempo de cómputo.

Para el proceso de los datos geográficos y su clasificación en dicha estructura de *clusters*, se emplea un procedimiento de búsqueda común A\* basado en el empleo de funciones heurísticas que mejoran su eficiencia. En este caso, se emplea una función heurística de coste uniforme, con valor nulo, ya que un accidente se puede producir en cualquier nodo presente en la red y, por tanto, no puede ponderarse ninguna dirección de búsqueda concreta durante la clasificación de los nodos. Cada camino originado en la base es explorado hasta que las restricciones temporales del servicio no se cumplen, quedando así delimitada la frontera del *cluster*. Una característica de la función heurística de coste uniforme radica en el hecho que no sobreestima nunca el coste real del camino entre dos nodos. Igualmente, se trata de una función decreciente y, por tanto, los costes acumulados a lo largo de la exploración siempre aumentarán a medida que avance la búsqueda. Estas dos propiedades garantizan que todos los ca-

minos incluidos en la estructura de un *cluster* son óptimos y que ningún camino óptimo será descartado durante el proceso [12]. Asimismo, el algoritmo siempre explora aquellos nodos con un valor menor del coste acumulado en cada iteración, hecho que permite garantizar que el camino entre la base y cualquier nodo del correspondiente *cluster* es mínimo. Debido a que cualquier camino subóptimo a un nodo concreto tiene un coste mayor que la ruta óptima, se puede demostrar que cualquier camino subóptimo no se explorará nunca y que la solución devuelta será óptima.

Para el problema de transporte de mercancías en áreas metropolitanas es difícil encontrar una clasificación adecuada de la información GIS tan eficiente como en el problema anterior. En este caso, la localización de las peticiones de recogida y entrega no se conocen previamente, así que la información geográfica disponible debe aportar los rudimentos de cálculo del camino mínimo entre dos visitas cualesquiera. Como solución, se plantea una estructura de capas formada por grafos definidos a partir del hecho que la mayoría de rutas entre dos puntos se realiza por vías de comunicación principales. El número de capas queda determinado en función de la configuración de la red de carreteras del área tratada. En primera instancia, se detectan los núcleos principales de población y se determinan las principales vías de unión entre ellos. Seguidamente, los nodos y arcos correspondientes a dichos núcleos se clasifican recursivamente en estructuras de menor tamaño (distritos, barrios, etc.) siguiendo las conexiones principales entre ellas. De esta manera, el número de posibles caminos mínimos que deben ser calculados ante la llegada de una petición se ve reducida de forma significativa. Por ejemplo, únicamente se deberán calcular 200 caminos mínimos en un caso con 100 peticiones de recogida en una ciudad y entrega en otra ciudad, en lugar de las 10.000 rutas que deberían calcularse utilizando la información GIS que no ha sido procesada. Este hecho se debe a que sólo se tienen en cuenta las 100 rutas entre el punto de entrada o salida de las ciudades y los nodos donde se localizan las diferentes visitas. Igualmente, el tiempo em-

pleado en el cómputo de los caminos mínimos se reduce sustancialmente, ya que el número de nodos y arcos presentes en el grafo es menor. Para obtener la representación de los datos GIS en forma de estructura de capas se utiliza una aproximación basada en una metaheurística de colonia de hormigas (*Ant Colony - ACO*) [4]. Una aplicación interesante de esta estructuración de la información corresponde a las estrategias *cluster-first/route-second* para solucionar los problemas VRP en la fase de optimización [3].

#### 4.2. Asignación de recursos

La formulación del problema de optimización difiere dependiendo del tipo de VRP que se aborde. En el transporte de mercancías, la función objetivo incluirá el número de camiones que se necesitan para satisfacer todas las peticiones existentes, mientras que las restricciones reflejarán los horarios de trabajo, de descanso y las ventanas temporales de entrega, entre otros. Se han adoptado dos aproximaciones diferentes para resolver el problema de optimización discreta presentado, donde el objetivo es reducir los costes de transporte. La primera estrategia está basada en métodos de programación de restricciones [8], en la que se combinan dos elementos: el modelo, donde se definen las variables de decisión, las restricciones del problema y la función objetivo; el algoritmo de búsqueda utilizado para su resolución, que selecciona un valor en el dominio de cada variable restringida, de manera que se cumplan todas las restricciones. La segunda aproximación consiste en una combinación de técnicas de simulación y de búsqueda. El modelo de transporte se representa mediante el formalismo CPN y se utiliza el árbol de cobertura que de él se deriva para evaluar los estados factibles que se obtienen a partir de un estado inicial dado. Sin embargo, el árbol de cobertura de un sistema logístico puede crecer exponencialmente en función del número de eventos que se pueden disparar en paralelo. Por esta razón, se aplican técnicas basadas en heurísticas para reducir el espacio de búsqueda y conducir al sistema hacia el estado final deseado [9].

En la gestión de servicios de emergencia, el objetivo consiste en asignar de forma adecuada los recursos disponibles a los accidentes existentes, de acuerdo con las restricciones implícitas del problema, englobado en la categoría de problemas de satisfacción de restricciones (*Constraints Satisfaction Problem - CSP*). Estas restricciones determinan que el tiempo máximo de respuesta no debe ser superado por la solución dada e impiden que queden regiones desprovistas de recursos. En consecuencia, no se pueden asignar todos los recursos disponibles en una base a un único accidente, ya que no se cumpliría la segunda condición. Para resolver un problema de estas características se utilizan técnicas CSP, donde se utiliza la información obtenida durante el procesado de los datos geográficos para reducir el dominio de las variables de decisión. Por otro lado, un accidente puede ser directamente asignado a una base determinada con un coste computacional mínimo, ya que el nodo donde se ha producido pertenece a un *cluster* concreto o, en todo caso, se puede calcular el camino mínimo entre el accidente y la frontera del *cluster* más cercano. Así, la búsqueda de la solución se reduce a explorar los *clusters* más cercanos al punto donde se ha producido el accidente, reduciendo el espacio de búsqueda y el coste computacional. Sin embargo, eventualmente no es posible hallar una solución que satisfaga las condiciones temporales impuestas (accidentes ocurridos en zonas rurales, tráfico colapsado, etc.). En este caso, las restricciones temporales pueden ser relajadas o ponderadas, mientras se mantiene como objetivo la minimización del tiempo de respuesta. De esta forma, el objetivo consiste en asignar los recursos de manera que se satisfagan todas las condiciones impuestas excepto la ventana temporal de respuesta, que queda asimilada en la minimización de la función objetivo.

En ambos casos de estudio, la información disponible durante las operaciones de los sistemas de transporte cambia dinámicamente. Asimismo, la información disponible llega de forma continua desde diferentes fuentes, conteniendo un importante factor de incertidumbre. Por otro lado, la situación del tráfico puede

cambiar durante el transcurso de las operaciones de transporte, desde el momento en que la ruta es asignada hasta que finaliza el servicio, de manera que las rutas calculadas pueden perder su condición de optimalidad. Este tipo de situaciones podrían ser detectadas utilizando la información recibida desde los dispositivos GPS de los vehículos, ya que permiten determinar su posición y los movimientos realizados. Así, las correspondientes rutas deben ser nuevamente calculadas y, en algunas ocasiones, los vehículos tendrán que ser reasignados. Todas estas situaciones pueden ser representadas mediante el módulo de simulación, de forma que las herramientas de soporte a la toma de decisiones pueden ser diseñadas de forma apropiada y validadas sin los costes asociados a la experimentación en un sistema de transporte real.

## 5. Conclusiones

Este artículo presenta una plataforma distribuida basada en CORBA desarrollada para el diseño, implementación y validación de herramientas de soporte a la toma de decisiones en problemas de logística y transporte. Debido a su modularidad y su estructura distribuida, esta plataforma puede ser fácilmente adaptada para afrontar diferentes instancias de problemas VRP, mediante la introducción o sustitución de los diferentes módulos que la componen. En el proceso de validación se utiliza un simulador de flotas para determinar la eficiencia de las herramientas diseñadas. Dicho simulador está basado en un modelo que puede ser parametrizado en función del problema VRP que se desea abordar.

Las herramientas de soporte a la toma de decisiones están basadas en una aproximación que consta de dos fases. En la primera de ellas, los datos geográficos son procesados, mediante su análisis y clasificación en una estructura acorde con las necesidades del problema VRP objeto de estudio. A su vez, con este proceso se reduce el tiempo que será necesario para calcular los caminos mínimos entre las localizaciones correspondientes a las diferentes peticiones de transporte. Igualmente, esta reorde-

nación de la información geográfica puede ser utilizada para reducir el dominio de las variables de decisión, delimitando así el espacio de búsqueda en la resolución del problema. En la segunda fase, los recursos son asignados y se calculan las correspondientes rutas, considerando las estructuras de caminos mínimos obtenidas durante el preproceso. Actualmente, se está trabajando en dos aproximaciones diferentes para modelar y resolver las diferentes instancias del problema VRP: programación con restricciones y la combinación de técnicas de simulación y búsqueda.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo del *Departament d'Universitats, Recerca i Societat de la Informació* de la Generalitat de Catalunya, del Ministerio de Fomento y del Ministerio de Ciencia y Tecnología (proyectos DPI2004-08056-C03-01 y DPI2004-08056-C03-02).

### Referencias

- [1] Bektas, T., *The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solutions procedures*, The International Journal of Management Science, 34, 2006.
- [2] Busquets, S., Vilalta, L., Piera, M.A., Guasch, A. and Narciso, M., *Specification of metaheuristics in Colored Petri Nets models to tackle the Vehicle Routing Problem*, International Mediterranean Modeling Multiconference, Marsella (Francia), 2006.
- [3] Dondo, R. and Cerdá, J., *A cluster-based optimization approach for the multi-depot heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows*, European Journal of Operational Research, 176, 2007.
- [4] Dorigo, M. and Stützlze, T., *The Ant Colony optimization metaheuristics: algorithms, application and advances*, Ed. Glover, F. and Kochenberger, G.A., *Handbook of Metaheuristics*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2003.
- [5] Guimarans, D., Ramos, J.J., Piera, M.A. and Guasch, A., *A simulation based decision tool to coordinate emergency services in a road accident*, Summer Computer Simulation Conference, Calgary (Canadá), 2006.
- [6] Jensen, K., *Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use*, vol. 1,2,3, Springer-Verlag, Berlín, 1997.
- [7] Kelton, W.S., Sadowski, R.P. and Sadowski, D.A., *Simulation with Arena*, McGraw-Hill, 1998.
- [8] Marriott, K. and Stuckey, P., *Programming with constraints: an introduction*, MIT Press, 1998.
- [9] Narciso, M.E., Piera, M.A. and Guasch, A., *A knowledge representation approach suitable to support heuristic search methods frontiers in Artificial Intelligence and applications*, Artificial Intelligence Research and Development, 100, 2003.
- [10] OMG, Inc., *Common Object Request Broker Architecture: Core Specification*, 2004.
- [11] Papows, J., *Route optimization as energy policy*, Transport Topics, June 2001.
- [12] Russell, S. and Norvig, P., *Artificial Intelligence: a modern approach*, Prentice-Hall, 2003.
- [13] Silva, M. and Valette, R., *Petri Nets and flexible manufacturing*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 424, Advances in Petri Nets, 1989.
- [14] Wachs, M., *Fighting traffic congestion with information technology*, Issues in Science and Technology, 2002.
- [15] Zimmerman, A., Dalkowski, K. and Hommel, G., *A case study in modeling and performance evaluation of manufacturing systems using Colored Petri Nets*, European Simulation Symposium, Génova (Italia), 1996.