

LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LA DISTRIBUCIÓN URBANA DE MERCANCÍAS

.....
FRANCESC ROBUSTÉ
JOSÉ MAGÍN
MIQUEL ESTRADA

Centro de Innovación del Transporte, CENIT
Universidad Politécnica de Cataluña

DANTE GALVÁN

Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Argentina

51

LA CIUDAD ES UN ENTE VIVO QUE NECESITA DESARROLLAR UNA SERIE DE FUNCIONES PARA SOBREVIVIR, DENTRO DE LAS CUALES SE ENCUENTRA EL APROVISIONAMIENTO DE PRODUCTOS NECESARIOS PARA SU DEVENIR COTIDIANO.

Esta función de aprovisionamiento debe convivir con el resto de las funciones urbanas y puede llegar a entrar en conflicto con ellas.

Desde este punto de vista, y considerando que hoy en día la ciudad se compone de toda una serie de redes físicas y logísticas que estructuran una entidad compacta y compleja, podemos afirmar que la eficiencia en la organización de la ciudad como ente unitario complejo depende directamente de una buena orga-

nización de las redes logísticas que la componen, es decir, depende de la eficiencia de dichas redes. Así, podemos aventurar la necesidad de la consideración de la Logística Urbana como una nueva disciplina destinada a estudiar la forma de optimizar la eficiencia de las redes logísticas que componen la trama urbana.

Dentro de esta disciplina, y atendiendo a esa función primordial para el buen devenir de la ciudad, podemos considerar

que para mejorar la eficiencia en la organización de la vía pública debemos actuar directamente sobre la organización de las redes logísticas de distribución, y, más directamente, sobre la distribución urbana de mercancías. Este es un tema que, aún siendo fundamental en la ordenación de la circulación y en la optimización de las diferentes operaciones y servicios prestados en el espacio público urbano, históricamente ha sido relegado tanto desde el mundo académico como institucional; de hecho, prácticamente

ninguna ciudad tiene resuelto el problema globalmente.

Además, en los últimos años, se ha producido un desarrollo muy acusado en la aplicación de nuevas tecnologías en todos los aspectos de la actividad diaria, lo que supone la necesidad de proceder a su implantación como una necesidad imperiosa en un mundo cada vez más global y virtual. Y dentro del desarrollo de las nuevas tecnologías tiene una especial importancia el sector del transporte, ya no sólo como mero elemento de soporte físico para la distribución de mercancías y movimiento de viajeros, sino como auténtico motor de desarrollo económico.

El concepto de Logística Urbana tiene antecedentes claros en aportaciones como el libro de Larson y Odoni (1981) sobre investigación operativa urbana o el libro de Daganzo (1994) sobre logística. Pero la Logística Urbana va más allá de estas visiones parciales, ya que ahora se trata de replantearse todos los servicios y operaciones de la ciudad adaptando técnicas que se han aplicado con éxito en entornos privados y en muchos ámbitos del transporte y la logística empresarial: la reingeniería de los servicios urbanos.

Un punto importante es la consideración de los elementos a incluir dentro de esta nueva disciplina. Numerosos autores y entidades se refieren a la Logística Urbana considerando tan sólo la distribución urbana de mercancías, pero en realidad dentro de ella se pueden incluir desde temas tradicionalmente aceptados como

objeto de las operaciones logísticas clásicas hasta otras urbanas, necesitadas de análisis científico y una consideración global en el tejido urbano.

De este modo, y como se detalla en Robusté (1996), cabría englobar el transporte urbano en todas sus acepciones (transporte público, tráfico, aparcamientos, peatones, motos y bicicletas), el transporte de mercancías, los servicios de correos, los servicios de limpieza, riego y mantenimiento de calles, la recogida de basuras, los servicios de respuesta rápida (policía, bomberos, asistencia médica, etc.), las operaciones de mantenimiento de las redes de infraestructuras básicas urbanas, la gestión de parques y jardines, los servicios de nueva generación derivados del avance tecnológico en informática y telecomunicaciones (venta vía telefónica y el comercio a través de Internet o *e-commerce*).

Por último, existe un ámbito de aplicación que no puede escapar a éste concepto integrador de la logística urbana como es el referido a los suministros de servicios urbanos básicos, como son las redes de agua, electricidad, gas, teléfono, etc.

Aceptando que la lógica de funcionamiento de todos estos servicios y operaciones es, si no idéntica, sí similar (producción y entregas justo-a-tiempo, entregas en ventanas temporales, servicio a diario, adecuación de servicios a patrones de demanda, previsiones y prioridades, etc.) incidiendo en el uso del viario público y que, mediante una disciplina general capaz de integrarlas a todas (léase Logística Urbana), puede lograrse una

sinergia conjunta capaz de optimizar los recursos escasos de las áreas metropolitanas atendiendo a la vez a la sostenibilidad del sistema, se puede justificar el englobar bajo una misma perspectiva toda esta serie de operaciones y servicios urbanos, tradicionalmente diferenciados e independientes.

En este sentido, por ejemplo, el cálculo de rutas (*routing*), comprende 6 problemas básicos: el problema del viajante de comercio o TSP (*Traveling Salesman Problem*), el problema del cartero chino o CPP (*Chinese Postman Problem*), el problema de las multi-rutas de viajeros (*m-TSP*), el de las rutas de nodos para un almacén y múltiples vehículos, el de rutas de nodos para múltiples almacenes y múltiples vehículos, el problema de rutas de nodos con demandas estocásticas para un depósito y múltiples vehículos, y el del cartero chino con restricciones de capacidad. Cada uno de estos problemas puede aplicarse a toda una serie de elementos o servicios englobados dentro de la Logística Urbana, como se muestra en el siguiente cuadro.

La importancia del estudio de este tipo de problemas se justifica por su complejidad, ya que incluso el caso más sencillo presenta una seria dificultad de cálculo. Por ejemplo, el TSP puede ser un problema muy difícil de resolver, ya que incluso con una versión simplificada del mismo existen $(n-1)!$ diferentes formas de visitar los puntos, que significan $(n-1)!/2$ soluciones del TSP (ya que cada ruta puede ser realizada en las dos direcciones en un caso simple). Numéricamente, una red con

CUADRO 1
TAXONOMÍA DE LOS PROBLEMAS DE RUTAS EN LOGÍSTICA URBANA

Demanda	Cobertura de arcos (<i>Chinese Postman Problem</i>)	Cobertura de nodos (<i>Traveling Salesman y Vehicle Routing Problem</i>)
Estable	Limpieza y riego de calles. Reparto a domicilio de correo. Recogida a domicilio de residuos. Gas. Agua. Saneamiento. Teléfono. Electricidad.	Líneas de transporte público. Recogida de contenedores de basura. Distribución de mercancías. Inspección y recolección de monedas en: teléfonos públicos, maquinas expendedoras de productos, etc.
Variable	Lectura de parquímetros.	Distribución de mercancías. <i>e-Commerce</i> . Telecompra. Paquetería. <i>Car-pool</i> . Rutas de: policía, bomberos, ambulancia, protección civil, etc. Envíos a domicilio: supermercados, comercios, comida, etc.

FUENTE: Larson y Odoni (1981)

ahorrar tiempo que se puede dedicar a otras actividades como los viajes. Hasta este momento se ha asistido al crecimiento simultáneo de las TIC y los viajes. Así se aprecia claramente que los efectos generadores de las TIC tienden a compensar los efectos de la sustitución (EC project HINT, 1997).

Las nuevas tecnologías, que aportan múltiples ventajas y comodidades al usuario, están generando una serie de nuevas circunstancias a las que las empresas deben responder y que alteran en mayor o menor medida todos los procesos y, en especial, a la fase de distribución. El análisis de las cadenas de distribución del B2C (*Business To Consumers*) (Robusté et al., 2003) muestra que las empresas deben adoptar nuevas formas de actuación para responder satisfactoriamente a las demandas de los clientes y cubrir sus expectativas (generadas por la implantación de las nuevas tecnologías).

Al mismo tiempo este análisis muestra el efecto que estas nuevas formas de distribución puede tener sobre las ciudades y que requerirá actuaciones de las administraciones para minimizar el impacto que la localización geográfica y temporal del *e-commerce* pueda traer sobre los actuales modelos de distribución urbana de mercancías.

Dentro del ámbito urbano es donde se iniciaron los sistemas telemáticos aplicados al transporte, ya que fue en el entorno urbano donde aparecieron los primeros problemas importantes de congestión de tráfico. Como aplicaciones telemáticas fundamentales en la gestión del transporte en el ámbito urbano que, bajo su componente del transporte urbano de mercancías, es el objeto de análisis de este artículo, se pueden citar inicialmente las siguientes:

Centralizaciones semafóricas. Son sistemas diseñados de una forma genérica y luego adaptados a cada caso particular. Están basados en un conjunto de detectores, controladores locales de semáforos, señales variables, elementos de comunicaciones y un sistema de control. Antiguamente funcionaban calculando los parámetros necesarios mediante modelos de simulación para actuar luego sobre el sis-



tema; actualmente ya se emplean sistemas capaces de estimar dichos parámetros en tiempo real.

Guiado e información al conductor.

Por un lado existen sistemas para el guiado a aparcamientos, basados en un sistema de captación de datos de plazas libres, un sistema de comunicaciones, un centro de control y un sistema de señales variables colocadas en zonas de confluencia de itinerarios. Otro tipo de guiado del conductor es el consistente en la recomendación de itinerarios o la indicación de los niveles de congestión de las vías. En estos sistemas los elementos más característicos son el conjunto de detectores de posición del vehículo, el ordenador de a bordo, el sistema de comunicaciones bidireccional para intercambiar información con el centro de control y el centro de control donde se calculan y analizan los itinerarios.

Transporte colectivo. La herramienta fundamental en este campo es el Sistema de Ayuda para la Explotación (SAE), concebido como una herramienta telemática de apoyo para el cumplimiento efectivo de todos aquellos aspectos relacionados con la explotación del transporte público. Sus objetivos básicos pasan por incrementar la calidad del servicio mejorando la regularidad, la información al cliente y la adaptación de la oferta a la demanda;

disminuir los costes de explotación y las inversiones requeridas optimizando el servicio en cuanto a vehículos y conductores se refiere; lograr mayor eficacia en la gestión de tráfico, aportar un mayor control técnico de la flota e incrementar la seguridad de los clientes y los conductores.

Monética. Se encamina a lograr eliminar la necesidad de emplear dinero en el pago de la tarifa de títulos de transporte. Además, los sistemas como la tarjeta inteligente incorporan una serie de servicios añadidos, permitiendo recopilar información sobre el uso del servicio, que luego puede ser aprovechada por el operador. Este tipo de tarjetas inteligentes (*chip-card*) aportan indudables ventajas: elevada relación prestaciones/precio, eliminación de papeles administrativos, integrables en sistemas ya existentes, asegura la privacidad del usuario y tiene una elevada capacidad de registro de datos.

Gestión medioambiental. Mediante sistemas parecidos a los descritos en apartados anteriores (estaciones de toma de datos, red de comunicaciones y centro de control) pueden gestionarse diversos campos relacionados con el medio ambiente. Los principales son el alumbrado público, logrando un elevado ahorro energético, la contaminación atmosférica, las condiciones meteorológicas y los parámetros físicos de los vehículos (gálíbo, peso por eje, etc.).

Aparte de las aplicaciones telemáticas ya comentadas, es necesario mencionar aquí el despunte de dos medios de comunicación que están suponiendo toda una revolución: Internet y la Telefonía Móvil. En cuanto a Internet, cada vez es más fácil encontrar desarrollos y aplicaciones específicas para el transporte integradas en las páginas web de las diferentes empresas del sector (sirva como ejemplo la posibilidad de realizar un seguimiento en tiempo real de paquetes, disponible en las páginas de casi todos los grandes operadores de paquetería), del mismo modo que, además, se ha convertido en uno de los medios de difusión de información más consultados en la actualidad.

En cuanto a la telefonía móvil de última generación, en este momento la segunda, pero la tercera está prevista que salga al mercado en breve, está sufriendo un desarrollo impresionante ligado totalmente a la integración de los móviles e internet. Actualmente ya funcionan servicios de soporte para internet en teléfonos móviles, aunque con restricciones en cuanto al formato de contenidos (por las bajas velocidades de transmisión de datos actuales a través de telefonía móvil no es posible visualizar imágenes), las llamadas páginas WAP (*Wireless Application Protocol*), que ya permiten realizar ciertas transacciones comerciales a través de internet vía móvil.

Pero la auténtica revolución en este sentido se producirá en cuanto funcionen a pleno rendimiento los nuevos sistemas de transmisión de datos UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), que permitirán anchos de banda de 2 Mb/seg, más potentes que los actuales sistemas de comunicación vía cable. Este avance supondrá todo un abanico de posibilidades merced a la integración de los ordenadores portátiles y agendas electrónicas con la telefonía móvil.

Analizando la implementación de las nuevas tecnologías por modos de transporte, el objetivo más comúnmente enunciado para la implementación de nuevas tecnologías en el transporte por carretera es el aumento de su eficiencia, seguridad y calidad ambiental del transporte por carretera. El transporte por carretera es, sin embargo, el modo de transporte en que los actores presentes son más diversos y en el cual los intereses son más divergentes. Esto implica que el desarrollo e implementación de una nueva tecnología es menos coherente en esta área del transporte que en otras. Las nuevas tecnologías en el sector del transporte se pueden aplicar a la infraestructura de tráfico (gracias a las distintas herramientas de gestión tanto del tráfico urbano como interurbano, a la gestión de la demanda y sistemas de información para el conocimiento del nivel de tráfico), a los vehículos (sistemas de asistencia al conductor, elementos de seguridad activa y pasiva, aumento de la eficiencia energética de los vehículos) y a la gestión de flotas.



Aunque el transporte por ferrocarril es altamente específico del transporte interurbano, y en su vertiente urbana está dedicado casi exclusivamente al transporte de viajeros, es necesario considerar algunas de sus vertientes de desarrollo, ya que en algunos casos afectan directamente a la actividad de distribución urbana de mercancías presentando muchas características distintas de los otros modos. Los esfuerzos actuales de investigación para los ferrocarriles se concentran en las líneas de alta velocidad, transporte combinado y crecimiento medioambientalmente sostenible del transporte así como en la separación de la infraestructura, la gestión y la operación. Desde el punto de vista de las nuevas tecnologías, la intermodalidad, el billeteaje, la información al viajero, la automatización, los sistemas de control del vehículo y los elementos de control y seguridad son las áreas más importantes de implementación de nuevas tecnologías en el transporte ferroviario.

Aparte de la clasificación tradicional por modos de transporte es posible, y muy interesante, el realizar la división de las tendencias en cuanto a aplicación de nuevas tecnologías respecto al ámbito del sector del transporte en el cual se encuadran éstas. Básicamente podemos considerar como temas relevantes en este sentido la seguridad, la sostenibilidad, la intermodalidad, la interoperabilidad, la alta velo-

cidad y la eficiencia en la explotación. De todas formas es posible encontrar toda una serie de nuevos desarrollos tecnológicos que podrían encuadrarse dentro de varios de estos temas, pero se ha procurado discernir una estructuración básica que no tiene por qué ser la única ni la más efectiva, pero sí es adecuada para los objetivos de la presente digresión.

Uno de los temas de gran relevancia hoy en día es el tema de la seguridad en el transporte, tanto para usuarios como para los técnicos responsables de la misma. En este campo, las aplicaciones más actuales pasan por el diseño avanzado de sistemas de protección y retención, arquitecturas de diseño de vehículos, sistemas avanzados de control, tecnologías de navegación global por satélite, sistemas electrónicos de seguridad e investigación sobre materiales con elevada capacidad para absorber energía sin ser altamente agresivos para las personas.

Otro gran reto para el sector del transporte en la actualidad es conformar una respuesta sostenible, en cuanto a respetuosa con el medio ambiente y la sociedad. Ya no es posible el crecimiento a cualquier precio, sino que debe preservarse la capacidad futura de desarrollo social y económico. En este campo, las tendencias actuales en nuevas tecnologías pasan por nuevos diseños para vehículos con siste-

(en *plazas-boras*) existente para carga y descarga sólo se utiliza en un 20%.

Un punto importante a tener en cuenta a la hora de analizar la distribución urbana de mercancías es que existe toda una serie de «actores» implicados en la misma, cada uno de los cuales tiene sus propios intereses y puntos de vista, que no necesariamente son convergentes. Los principales sectores a tener en cuenta en nuestro caso son:

Urbanistas. Preocupados de la distribución del espacio y la forma estética en la ciudad y en las viviendas, suelen quedar desplazados cuando la perspectiva a tratar son los servicios de una ciudad, sus flujos de movilidad o su funcionalidad.

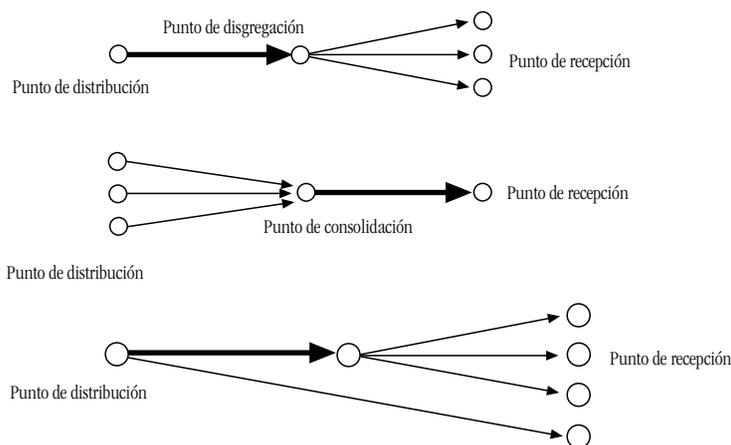
Ingenieros de transporte. Preocupados por la fluidez del tráfico y la seguridad vial, la perspectiva de la DU adoptada por estos técnicos es usualmente parcial y se centra en los perjuicios que los vehículos de DU generan al resto de automóviles y usuarios de la vía pública en general.

Cargadores (fabricantes). Usualmente la subcontratación del transporte hace que los cargadores «se olviden» del problema de la distribución, en el supuesto de que dejan el tema en manos de otros profesionales; al fin y al cabo, el objeto de los cargadores es saber qué y cómo producir.

Comerciantes. Son los verdaderos «clientes» de la DU y es natural que, en una situación no reglamentada como la actual, no tengan ningún interés en mantener stocks en sus tiendas y que dediquen el máximo de metro cuadrado del local a la actividad comercial de cara al público. Este *outsourcing* no aporta más que ventajas a los comerciantes y el posible riesgo incurrido viene eliminado por las entregas rápidas que los cargadores y los transportistas son capaces de garantizar.

Transportistas. Trabajan «a destajo», intentando garantizar la productividad con la rapidez. La distancia entre el estacionamiento para la descarga o la carga y el destino final de la mercancía debe ser mínimo por tiempo y por comodidad. Mien-

GRÁFICO 1
TIPOS DE DISTRIBUCIÓN: CENTRALIZADA, DESCENTRALIZADA Y MIXTA



FUENTE: Elaboración propia.

tras puedan estacionarán delante de la puerta y, como máximo, estarán dispuestos a desplazarse pequeñas distancias si se facilitan zonas de carga y descarga (C/D) con espacios disponibles y se regula muy estrictamente las paradas en doble fila o entorpeciendo la circulación.

Policía municipal. No dispone de recursos suficientes (y es posible que, aún disponiéndolos, tampoco fuera la estrategia de «vigilancia» la óptima para solucionar el problema) para esta misión, como se ha demostrado en el control de los parquímetros de superficie («Zona Azul»), que han tenido de dotarse de recursos humanos independientes (a pesar de los problemas jurídicos que éstos presentan en el caso de sanciones con desacuerdos).

Vecinos y demás usuarios de la vía pública. Se ven afectados de los continuos cambios de carril que las paradas en estacionamiento ilegal de los vehículos de DU obligan a hacer. Los resultados son demoras, menor capacidad efectiva del viario y posibilidad de algún accidente la mayoría de las veces sólo con daños materiales.

Administración local. Acostumbra a buscar la mejora de la calidad de vida de la población a la que se debe (reducción de la congestión, de la contaminación atmosférica y acústica, mejora de la seguridad vial, etc.), pero a menudo se ve con-

dicionada por perspectivas coercitivas y olvida las necesidades logísticas que permiten que la ciudad siga palpitando.

Fabricantes de vehículos de transporte de mercancías. Se centran a menudo en ergonomía vinculada al movimiento y la conducción y sólo desde hace muy poco comienzan a centrarse en la funcionalidad estática y de mantenimiento.

Juristas. Es necesario en este sector una interpretación amplia, generosa y moderna de la legislación para permitir la agilidad necesaria en la DU.

Una vez establecidos los «actores» que intervienen dentro de la actividad de distribución urbana de mercancías, deben tenerse en cuenta toda una serie de variables que nos van definir sus características, problemas y necesidades.

Para empezar, debemos considerar cuál es el tipo de mercancías que se transportan, ya que cada tipología tiene unas determinadas necesidades en cuanto a pesos y dimensiones mínimas, condiciones de protección y seguridad, factor de carga o estiba del vehículo, etc. con lo que nos van a condicionar elementos posteriores de la cadena.

Otro elemento importante, que surge como determinante en el análisis de la DU es el tipo de vehículo. Sus dimensiones,

peso máximo autorizado, tipología de caja, etc. van a condicionar en gran manera las condiciones del reparto de las mercancías, ya que en casi todas las ciudades existen normativas de acceso y circulación para los vehículos de transporte de mercancías.

Debemos prestar especial atención al tipo de suministro que se realiza en los locales de destino de la mercancía, ya que este parámetro influirá sobre otras variables como la frecuencia de los envíos al local, el tipo de vehículos que se empleará, el tamaño del pedido, etc. Las formas básicas a considerar son la distribución centralizada (todas las mercancías destinadas a un destino o conjunto de destinos concreto vienen de un mismo origen), la descentralizada (cada tipo de mercancía o producto concreto es distribuido desde un diferente origen) y las posibles combinaciones o variaciones de ambas.

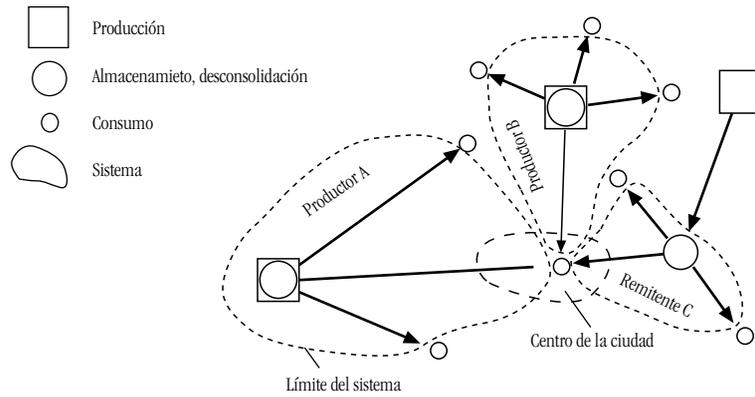
Otra variable importante es el horario de entrega de las mercancías. Generalmente los horarios vienen impuestos por las normativas urbanas, pero el problema es que se concentran las operaciones en unas determinadas franjas horarias muy sobrecargadas y que, además, suelen coincidir con las puntas del tráfico urbano. Por este motivo existe toda una serie de acuerdos y restricciones que afectan a los posibles horarios de entrega de las mercancías en zona urbana.

También hay que tener en cuenta el número total de las operaciones de recogida y reparto de mercancías que se realizan en los locales comerciales y la frecuencia de las mismas, ya que contribuirán a determinar el tipo de suministro y la tipología de los vehículos.

Por otra parte, es preciso considerar también la forma de operar de los operadores de transporte (origen interurbano o urbano de la mercancía entregada, número de viajes realizados por cada vehículo, distancia medias de recorrido, factor de carga del vehículo) ya que la optimización de las operaciones de transporte es uno de los puntos principales de actuación para la mejora de la DU.

Pero quizás el parámetro más evidente de la distribución urbana de mercancías sea

GRÁFICO 2
RED DE DISTRIBUCIÓN EN UN ENTORNO URBANO
SIN UN PLAN LOGÍSTICO COORDINADO



FUENTE: Elaboración propia.

el tiempo de la operación de entrega y/o recogida de mercancías en la vía pública. En este parámetro deberán considerarse los siguientes factores:

- Llegada al local de destino de las mercancías y estacionamiento en sus inmediaciones.
- Aviso de la entrega/recogida en el local y confirmación de la misma.
- Preparación del pedido en el vehículo.
- Descarga y traslado de las mercancías hasta el local de destino, o a la inversa, en el caso de una recogida.
- Control del pedido entregado/recogido.
- Operaciones administrativas.
- Partida

Además de los anteriores, y directamente relacionado con el tiempo de la operación de entrega y/o recogida de mercancías en la vía pública, hemos de considerar también la existencia de zonas destinadas a la carga y descarga de mercancías en las proximidades de los locales de destino, ya que influirá directamente en el tiempo de las operaciones de carga y descarga y en las interacciones con el tráfico urbano.

Teniendo en cuenta todos los parámetros enunciados y atendiendo al caso más amplio, que sería aquel en el que se considerase una red de distribución física de muchos orígenes a muchos destinos, se

puede formular el problema básico de recogida y distribución de mercancías en los términos siguientes.

Se considera que existen N clientes, pero que cada uno de ellos ($i \in N$) requiere el transporte desde un origen i^+ a un destino i^- . Por lo tanto, existe un conjunto de orígenes representado por $N^+ = \{i^+ \mid i \in N\}$ y un conjunto de destinos representado por $N^- = \{i^- \mid i \in N\}$. El grafo $G = (V, A)$ tiene un conjunto de vértices $V = \{0\} \cup N^+ \cup N^-$, y un conjunto de arcos $A = (\{0\} \cup N^+) \cup I \cup (N^- \cup \{0\})$, donde $I \subset (N^+ \cup N^-) \cdot (N^- \cup N^+)$ es el conjunto de arcos que conectan a los orígenes y destinos. Por cada cliente $i \in N$, hay una demanda q_i y dos ventanas de tiempo $[e_i^+, l_i^+]$ y $[e_i^-, l_i^-]$. Por cada arco $(i, j) \in A$, hay un coste c_{ij} y un tiempo t_{ij} , y finalmente, hay un conjunto M de vehículos de capacidad Q .

La programación matemática también tiene tres variables: x_{ij}^k ($(i, j) \in A, k \in M$), que es igual a 1 si el arco (i, j) es usado y 0 si no lo es; D_i ($i \in N^+ \cup N^-$), que especifica el tiempo de salida del cliente i ; e y_i ($i \in N^+ \cup N^-$), que especifica la carga del vehículo que llega a i . Las variables de flujo tienen un tercer índice para asegurar que la recogida en i^+ y la distribución en i^- son realizados por el mismo vehículo (fórmula c). El problema consiste en minimizar el coste total de viaje, representado por la fórmula siguiente.

Siempre que,

$$\sum_{(i,j) \in A, k \in M} C_{ij} x_{ij}^k$$

$$\sum_{k \in M} \sum_{j \in V} x_{ij}^k = 1$$

para $i \in N^+$, (a)

$$\sum_{j \in V} x_{ij}^k - \sum_{j \in V} x_{ji}^k = 0$$

para $i \in N^+ \cup N^-, k \in M$, (b)

$$\sum_{j \in V} x_{i+j}^k - \sum_{j \in V} x_{j-i}^k = 0$$

para $i \in N, k \in M$, (c)

$$D_i^+ + t_{i+} \leq D_i^-$$

para $i \in N$, (d)

$$x_{ij}^k = 1 \Rightarrow D_i + t_{ij} \leq D_j$$

para $(i,j) \in I, k \in M$, (e)

$$e_i \leq D_i \leq l_i$$

para $i \in N^+ \cup N^-,$ (f)

$$x_{ij}^k = 1 \Rightarrow y_i + q_i \leq y_j$$

para $(i,j) \in I, k \in M$, (g)

$$0 \leq y_i \leq Q$$

para $i \in N^+,$ (h)

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}$$

para $(i,j) \in A, k \in M$, (i)

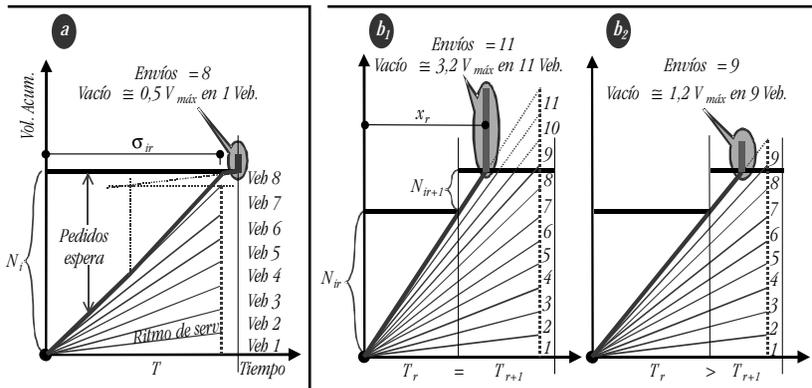
Minimizar esta fórmula sujeta a (a), (b) y (i) es un problema de flujo multi-producto de mínimo coste, y tiene una estructura más compleja que el VRPTW. Las restricciones (e) y (f) aseguran la factibilidad de la programación y las restricciones (g) y (h) garantizan la factibilidad de las cargas.

E-COMMERCE Y E-LOGISTICS EN EL ÁMBITO URBANO

El comercio electrónico o *e-commerce*, se presenta como una fuente de demanda de espacio viario, caracterizada por prácticas como el *Just-in-time*, *cero stock*, distribución personalizada con ventanas de tiempo reducidas, etc., que incrementan las necesidades de transporte y *pick-up-and-delivery*. La inclusión en el medio urbano de un gran número de vehículos de transporte de mercancías circulando medio vacíos, hace que las administraciones deban cuestionarse, o al menos evaluar, la viabilidad del modelo de servicio ofrecido actualmente por las tiendas virtuales.

Existen sectores como el del consumo, en los que la entrada de competidores «*punto.com*» (nacidos en la red), ha provocado una incursión masiva de empresas *e-tra-*

GRÁFICO 3
INEFICIENCIAS EN LA DISTRIBUCIÓN CON VENTANAS TEMPORALES



FUENTE: Galván 2002.

dicionales (nacidas de tiendas físicas) que venden sus productos, como parte de una estrategia de posicionamiento *on-line*. Las especiales características del pedido (volumen, *picking*, manipulación, etc.) y del servicio (franjas horarias, entrega personal, etc.), hacen que este canal de venta sea un verdadero desafío logístico para las *e-empresas*.

En este escenario, las decisiones logísticas tienen importantes repercusiones económicas y financieras no sólo sobre la cadena de suministro, sino sobre todo el ámbito empresarial y muchas veces determinan el éxito o fracaso del negocio. La baja demanda actual y la necesidad de diferenciarse mediante el servicio al cliente, sumados al carácter crítico de las decisiones, hacen indispensable contar con herramientas para determinar los recursos necesarios y los costes asociados a cada nivel de servicio. La *e-empresa* no puede ajustar su nivel de servicio mediante «prueba y error», porque el cliente *on-line* solo está a un «click» de comprar en la competencia.

A partir de diversos análisis y estudios europeos, se ha procurado facilitar a las empresas herramientas que les permitan planificar convenientemente su estrategia, dimensionar la flota de vehículos de transporte necesaria y diseñar sus rutas de recogida y reparto de mercancías. Uno de estos estudios es la tesis doctoral de Galván D. (2002), que establece los efectos de las ventanas temporales de entrega de mercancías sobre el rendimiento del

sistema de distribución de empresas de transporte urbano.

Según esta tesis en un sistema de distribución de un origen a muchos destinos sin ventanas de tiempo, los envíos necesarios para cubrir la demanda son función del número de clientes a visitar, la cantidad de entregas a cada cliente (en este caso, una entrega), el volumen del pedido (v) y la capacidad máxima de los vehículos (V_{max}). Pero cuando un vehículo no dispone del tiempo (σ_{tr}) necesario para repartir ininterrumpidamente su capacidad U_{max} (V_{max} / v), debido al limitado periodo de entrega disponible (T_r), el número de envíos deja de ser solo función de la demanda y la capacidad máxima (N_i / U_{max}), para pasar a depender también del ritmo de servicio de los vehículos (determinante de los vehículos que deben operar simultáneamente en ese periodo). En este caso se puede estar en presencia de una «ineficiencia» del sistema causada por la introducción de las franjas horarias.

La siguiente figura muestra como aumenta el número de envíos de 8 a 11 (b_1) y a 9 (b_2) con la introducción de las franjas horarias. En ella, la ineficiencia se traduce indefectiblemente en una subutilización de la U_{max} de los vehículos, pero si se incorpora una tercera franja horaria, la ineficiencia podría traducirse en esta subutilización (vehículos semi-llenos) o, en un «tiempo muerto» de los vehículos (espera hasta el comienzo de la próxima franja horaria para reiniciar el reparto).

da uno de los diferentes aspectos considerados como básicos dentro del transporte urbano de mercancías. Entre el material elaborado por los expertos que trabajan en este proyecto destacan los manuales de buenas prácticas, que recopilan y analizan las últimas experiencias europeas en la materia.

También es destacable la iniciativa del *Ministère de l'Équipement* de Francia denominada *Transports de marchandises en ville* (página web <www.transports-de-marchandises-en-ville.org>). En esta página se pueden encontrar, entre otras materias de estudio, un estado del arte de la distribución urbana de mercancías y una herramienta de búsqueda bibliográfica. También encontramos, como en las iniciativas antes mencionadas, una colección de casos desarrollados en el entorno europeo y algunos informes y estudios relacionados con el tema, además de la posibilidad de contactar con los expertos que están desarrollando investigación al respecto.

Desde un punto de vista más global (entendiendo por global un ámbito de aplicación no restringido a la Unión Europea), hay que destacar también la iniciativa de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE). Esta organización ha creado también un grupo de trabajo sobre el transporte urbano de mercancías, destinado a determinar las políticas más apropiadas para el transporte urbano de mercancías basándose en la innovación, la conectividad, la eficiencia del transporte y la minimización de las emisiones contaminantes. Pretenden identificar los impactos de las nuevas tecnologías, de las políticas del sector privado y de la planificación urbana para establecer unas guías de buenas prácticas.

Como en el resto de las iniciativas antes comentadas, también han establecido un punto de referencia a través de una página web <<http://www.distriweb.nl>>, en la que se puede consultar el informe que están preparando al respecto, acceder a un forum de expertos y consultar algunos estudios relacionados con el tema.

Estos casos son, quizás, los más representativos, pero distan mucho de ser los úni-



cos. Más bien al contrario, se pueden encontrar muchas más iniciativas, aunque ya con un carácter más local, como por ejemplo la iniciativa Holandesa *Platform Stedelijke Distributie*.

Por otra parte, el coste de validación de aplicaciones telemáticas en la distribución urbana y en general en el transporte, conjuntamente con la dificultad de concentrar en un marco común a todos los actores que juegan un papel en el transporte de mercancías, han limitado el desarrollo de nuevas tecnologías para la optimización y innovación en la logística urbana en Europa. Este hecho motivó a la Comisión Europea a la creación de un Programa de Aplicación de Sistemas Telemáticos de Transporte, en los distintos Programas Marcos de I+D.

De este modo, la inversión que ha destinado la Comisión Europea ha sido el principal factor de potenciación y sinergia de las iniciativas de aplicación de sistemas inteligentes de transporte basados en la distribución urbana de mercancías; en el que bajo un mismo proyecto se han agrupado administraciones locales, empresas logísticas, consultorías e investigadores universitarios.

En este sentido, dentro del 4º FP se desarrolló un proyecto llamado SURFF (*Sustainable Urban and Regional Freight*

Flows, 1996-1998) en el que se validaron diferentes soluciones telemáticas para optimizar el transporte de mercancías y las actividades de centros logísticos en 7 ciudades europeas (Bolonia-ITA, Le Havre-FRA, Tilburg-NED, Aalborg-DEN, Estocolmo-SWE, Linz-AUS y Aspropyrgos-GRE).

El conjunto de iniciativas de sistemas inteligentes de transporte que plantea este proyecto se puede agrupar según su naturaleza en:

UN MARCO DE COMUNICACIONES ENTRE LA OPERADORA, EL CONDUCTOR DEL VEHÍCULO Y LOS CENTROS LOGÍSTICOS

Las fases de desarrollo de esta iniciativa pasan por los siguientes puntos:

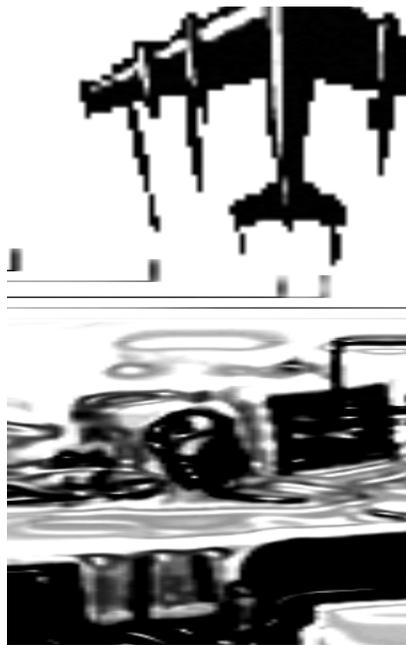
Creación de una plataforma de telecomunicaciones común entre empresas logísticas. Este hecho ofrecerá a los distintos operadores un marco común de información y prestación de servicios encaminados a la planificación de las rutas y optimización de la gestión de la flota (servicio de optimización de rutas, sistema de gestión de mantenimiento de la flota, sistema de definición de la zona de servicio de cada vehículo, etc.).

Acceso común a comunicaciones móviles de datos. Esta función se basa en crear una comunicación en tiempo real y bidireccional entre los operadores de transporte y los vehículos que realizan la distribución. Se basa principalmente en instalar en el interior del camión una unidad de abordo (fig.1) que mediante la tecnología GSM-SMS y GPS permite recibir datos del servicio a prestar o modificaciones de la ruta, informar de eventualidades al centro de operaciones de la empresa distribuidora y determinar la posición exacta del vehículo.

Conexión a sistemas de información de tráfico. Las unidades de abordo instaladas en los vehículos permiten recibir información del estado del tráfico del centro de la ciudad y de sus vías de acceso. Esta información es habitualmente ofrecida por entes u organismos locales o regionales.

Integración global de la cadena de transporte multimodal. En este punto se plantea la explotación de toda la información de tráfico y la transmitida por las nuevas plataformas de comunicación para coordinar las operaciones de rotura de carga en las terminales descentralizadas de una misma cadena de distribución. Esta fase también integra la optimización de los servicios de los vehículos de distinta capacidad (vehículos maniobrables y de reducida capacidad para la distribución al centro de la ciudad y vehículos más pesados para el abastecimiento de los almacenes) que concurren en los centros o terminales de consolidación.

El grado de desarrollo de esta línea de aplicación de SIT en las ciudades objeto de estudio ha sido distinto. Mientras en Le Havre y en Tilburg los SIT han evolucionado completando las cuatro fases detalladas anteriormente, en Aspropyrgos y Aalborg únicamente se ha implementado la fase 4 en lo que se refiere a la sustitución de los pedidos telefónicos o vía fax por su transferencia vía Internet. En Linz la consecución de las cuatro fases únicamente se ha realizado para el caso del ferrocarril como modo de transporte de abastecimiento de mercancías al conjunto de la ciudad. Cabe destacar especialmente el caso de Estocolmo, en el que se han implementado adicionalmente a las cua-



tro fases una tecnología de trazabilidad de la mercancía de cada vehículo (aseguramiento de la entrega).

UN SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN Y TRAZABILIDAD DE LA MERCANCÍA

En este sentido, en la ciudad danesa de Aalborg se desarrolló un sistema de lectura e identificación de contenedores en las terminales (sistema ConPos) para su correcta identificación y trazabilidad. La metodología se basa en lectores portátiles de las etiquetas de códigos de barras que eran fijadas en cada contenedor, de forma que la identificación de cada lectura se comparaba con las bases de datos existentes relativas a su localización.

Este mismo procedimiento se ha extrapolado a algunos vehículos de distribución de la ciudad, donde se ha instalado un lector de a bordo de códigos de barras que permite actualizar el estado de distribución de cada mercancía.

APLICACIONES INFORMÁTICAS DE SIMULACIÓN DE TRÁFICO

Bajo estos planteamientos se pretende simular diferentes estrategias de gestión de tráfico para determinar sus efectos a priori. Los programas de simulación están ba-

sados en modelos matemáticos que permiten estimar la demanda futura de cada servicio, considerar los puntos de partida (almacenes) y las posibles rutas de los vehículos para finalmente realizar un proceso de asignación de cada unidad física a un vehículo.

Estas iniciativas se han llevado a cabo en la ciudad de Bolonia, y especialmente en Estocolmo donde se han realizado simulaciones de optimización del actual proceso, considerando escenarios de reparto en periodos nocturnos y en horas valle de tráfico para determinar qué reducciones de tiempo de cada ruta se podrían ahorrar.

Por su lado, el proyecto Euroscope (*Efficient Urban Transport Operation Services Co-Operation of Port Cities in Europe*, 1996-1998), financiado también por el 4FP en el programa de aplicaciones telemáticas de la CE, analiza el diseño de sistemas de información en las terminales que consideren la integración de los distintos modos de transporte, los centros de distribución e intercambios de carga y las conexiones con los centros de control.

Para ello, el proyecto también plantea la necesidad principal de formación de un sistema electrónico de intercambio de datos (EDI-*Electronic Data Interchange*) entre los operadores, vehículos, centros logísticos y clientes.

La validación de los sistemas telemáticos propuestos para la distribución de mercancías se ha realizado principalmente en Colonia y Hamburgo. En la primera ciudad, el EDI desarrollado no tuvo gran aceptación por parte de los operadores por problemas en la fiabilidad y actualización de las bases de datos procesadas sobre las operaciones de los vehículos. Sin embargo, en lo referente a la plataforma de comunicación vía Internet entre el operador y el cliente devino un medio útil de gestión de pedidos y por tanto se desencadenó su amplia utilización como un elemento de marketing.

Por otro lado, en Hamburgo se definió un sistema llamado DAKOSY que integraba una componente basada en EDI y la tecnología GPS para la determinación de la

localización de cada camión. Esta información se transmitía a la central de operaciones de forma que se detallaba en cartografía digital (GIS) el estado y posición de toda la flota simultáneamente. El crecimiento y utilización del sistema DAKOSY han permitido su desarrollo comercial de forma que actualmente su servidor en Internet permite la contratación de distintos servicios de distribución basados en aplicaciones telemáticas.

Finalmente, otro proyecto destacable en el marco del 4 FP, en el Programa de Transporte es el conocido por el acrónimo LEAN (*Introduction of Lean LOGISTICS into urban multimodal transport management in order to reduce space requirements and optimise the use of transport modes*, 1997-1999). En el seno de este proyecto se ha desarrollado una herramienta telemática de gestión de las zonas de carga y descarga. Se plantea la creación de una página en Internet donde todas las empresas distribuidoras pudieran reservar las zonas de carga y descarga del centro de cada ciudad. Cada solicitud sería gestionada por un centro de control, quién enviaría un mensaje de confirmación al solicitante por Internet y a su vez, una señal vía la red GSM o SMS a un aparato receptor ubicado físicamente en cada plaza de C/D de la ciudad.

En este sentido, cuando el usuario llegara a su plaza de C/D asignada, debería identificarse en el aparato mediante una tarje-

ta identificativa que incluiría un chip electrónico. Este servicio permitiría que en los periodos en que la plaza no haya sido reservada por ningún vehículo de distribución, ésta pudiera ser utilizada por los vehículos privados hasta un tiempo máximo definido por la próxima solicitud de ocupación de otro vehículo de distribución. Este tiempo máximo y las características del vehículo estacionado podrían ser consultados en una pantalla incorporada a cada aparato receptor.

Este sistema fue implantado en una zona comercial de la ciudad austriaca de Linz y se pudo determinar su viabilidad tanto económica como técnica al no precisar ningún tipo de conexión física con el centro de control.

• • • • •
BIBLIOGRAFÍA

CAMPOS CACHEDA, J.M. Y C. CASAS ESPULGAS (2003). «Los ingenieros de transporte ante el reto de las nuevas tecnologías». Actas del IV Congreso Nacional de la Ingeniería Civil, volumen II, pp.2069-2074. Madrid, noviembre de 2003. ISBN: 84-380-0259-5 .

DAGANZO, C.F. (1994). *Logistics systems analysis*. Segunda edición. Springer-Verlag. ISBN 3-540-65533-6.

EUROSCOPE: Efficient Urban Transport Operation Services Co-Operation of Port Cities in Europe (1999). «Project Recommendations EUROSCOPE Book». TR1023. 4FP.

GALVÁN, D. (2002). *Modelización del e-logistics para el B2C en ámbitos urbanos*. Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña. Tesis doctoral dirigida por el Dr. Francesc Robusté.

GALVÁN, D. Y F. ROBUSTÉ (2002). «Modelización del e-logistics para el B2C en ámbitos urbanos». Actas del V Congreso de Ingeniería del Transporte, vol. II pág. 767-774. Santander 11-14 de junio de 2002. Editado por Angel Ibeas y José Mª Díaz. ISBN: 84-699-7741-5.

INSTITUTE FOR TRANSPORT STUDIES (1997). EC project HINT «Deliverable D1». University of Leeds.

LARSON, R.C. Y A.R. ODONI (1981). *Urban Operations Research*. Prentice-Hall. ISBN 0-13-939447-8.

LEAN: Introduction of LEAN LOGISTICS into urban multimodal transport management in order to reduce space requirements and optimise the use of transport modes (2000). «Final

Report». Contract No.: PL97-2113. Consorcio formado por AICIA, ALCATEL, ARRC, AST, BLSG, ECONSULT, PROINCA y WRDL.

PORTAL, material didáctico de transporte. (2003). «Transporte urbano de mercancías y logística en las ciudades». www.eu-portal.net

ROBUSTÉ, F. (2003) «Logística de la distribución urbana de mercancías». *Papers*, núm. 38, 29-47. ISBN: 84-88068-71-9. (En catalán).

ROBUSTÉ, F. (2000) «La logística del transporte y los Centros Integrados de Mercancías» Actas de las Primeras Jornadas sobre Centros Integrados de Mercancías (CIM), páginas 27-50. Burgos, 30 noviembre-1 diciembre de 2000. ISBN: 84-89875-19-7.

ROBUSTÉ, F. (1999). «Logística de la distribución urbana de mercancías». *I Congreso Internacional de Ingeniería de Tráfico Urbano*, Madrid 14-16 de abril de 1999. ISBN: 84-699-2373-0.

ROBUSTÉ, F., J.M. CAMPOS et al. (2003). *Libro verde del transporte en España*. Comisión de Transportes. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid. ISBN 84-380-0232-3.

ROBUSTÉ F., D. GALVÁN D. Y A. LÓPEZ PITA (2003). «Modeling e-logistics for urban B2C in Europe». *Transport Research Board (TRB) annual meeting*, Washington 12-16 enero 2003, CD-ROM.

ROBUSTÉ, F.; CAMPOS, J.M. Y GALVÁN, D. (2000). «Nace la Logística Urbana». Actas del IV Congreso de Ingeniería del Transporte, Vol. 2, pág. 683-691. Valencia, 7-9 de junio de 2000. Editado por J.V. Colomer y A. García. ISBN: 84-699-2603-9.

SURFF: Sustainable Urban and Regional Freight Flows (1996). «Summary Report». TR 1053. 4 FP. Consorcio formado por PTV, AFT/IFTM, CSST, IBM, NEA, NTU, TFK, TRADEMCO, UoW y U&P.