

## **INTRODUCCIÓN**

Las empresas de distintos sectores económicos han concebido la logística como un proceso estratégico para mantener su actividad y garantizar la eficiencia de las operaciones de producción y su competitividad en el mercado. La logística empresarial integra de forma coordinada distintas operaciones y áreas de decisión como son los inventarios, las instalaciones, la producción, el empaquetamiento y especialmente el transporte y distribución de los productos a los distintos puntos de venta.

Las operaciones de transporte y la distribución de los productos representan unos costes significativos para estas empresas y en muchos casos las redes propias de transporte son demasiado rígidas a las variaciones de la demanda producidas por el mercado. Este hecho ha producido el nacimiento de los operadores logísticos y empresas de paquetería: empresas especializadas cuyo objeto de negocio es el servicio de transporte y distribución de productos a gran número de clientes. De este modo, el fenómeno de externalización y subcontratación de la distribución de productos a empresas de paquetería es un fenómeno muy común al ofrecer unos precios más competitivos, una mayor flexibilidad y una mejor gestión de los envíos en relación al transporte con flota de vehículos propia.

El mercado exige una organización eficiente de los recursos utilizados para poder ofrecer un servicio adecuado a unos precios competitivos. Sin embargo, la configuración y operativa óptima del sistema de distribución están afectadas en muchos casos por la complejidad asociada a la multiplicidad de orígenes y destinos servidos por la red de distribución, la variabilidad espacial y temporal de la demanda y los plazos temporales reducidos de distribución.

Con el fin de hacer viable el sistema logístico cumpliendo los requerimientos de los clientes, las empresas de paquetería han implantado distintas estrategias de distribución para el transporte de mercancía de muchos orígenes a muchos destinos. La principal estrategia que revolucionó el devenir de las empresas de transporte de carga en EE.UU. a principios de la década de los años 80s fue la utilización de terminales de rotura de carga (*hubs*), puntos en los que se rompe la cadena directa entre orígenes y destinos. La implantación de las terminales de consolidación (*hubs*) permitió la operación en *hub&spoke*, basada en la consolidación de envíos de mercancía a un *hub* y posterior reparto a los destinos para incrementar el factor de carga de los vehículos.

Adicionalmente, se plantean otras estrategias posibles como son la de paradas múltiples (*peddling*) en el origen o en el destino de la cadena de transporte, de forma que en la mayor parte del desplazamiento el vehículo circule a plena capacidad. Si en la estrategia *hub&spoke* se consolidaba la carga en la terminal, en este tipo de estrategias se consolida la carga en el vehículo. Otra estrategia en la distribución entre muchos puntos es el envío directo, utilizada cuando entre un par de puntos origen-destino existe suficiente demanda para llenar la capacidad del vehículo de reparto.

La aplicación de las distintas estrategias de envío en las empresas de paquetería ha motivado el desarrollo de una red de distribución jerarquizada. Existen centros de consolidación de carga de primer nivel de ámbito nacional o internacional comunicados a infraestructuras importantes (autopistas, aeropuertos, puertos, etc.) y ligados a zonas económicamente estratégicas; centros de consolidación de segundo nivel de ámbito regional y los puntos o almacenes de ámbito local desde los que se recoge o se entrega la mercancía directamente a los clientes particulares.

Este hecho obliga a que la planificación del sistema de distribución se articule en dos direcciones: la red entre terminales y almacenes en las que se utiliza vehículos específicos de gran capacidad (red troncal); y en segundo término la red entre cada terminal y sus clientes asociados. Esta red es servida con vehículos más flexibles para moverse en entornos urbanos y de menor capacidad (red capilar).

Este documento analizará el problema de la planificación del sistema de transporte en la red troncal de muchos orígenes a muchos destinos con la consideración de terminales de rotura de carga o *hubs*. Este problema incluye dos fases diferenciadas: la planificación estratégica de la localización y número de terminales de consolidación o *hubs* y el diseño de rutas entre los orígenes, los destinos y las terminales *hub* cumpliendo las restricciones del problema.

El problema de asignación de envíos a rutas y la localización de terminales *hub* en la red troncal es un problema complejo, considerado como *NP-Hard* en el campo de la optimización combinatoria (un algoritmo que asegura el óptimo global requiere una complejidad de orden superior al polinómico en las variables del problema). De este modo, son necesarias herramientas de optimización que con un tiempo computacional acotado permitan la determinación de configuraciones de distribución eficientes con unos costes cercanos a la solución óptima.

La producción científica para el desarrollo de metodologías de optimización en problemas de distribución en la red troncal entre terminales es numerosa y se centra en modelos de programación matemática entera lineal y no lineal. Sin embargo, la mayoría de contribuciones que abordan la problemática de localización de los *hubs* en la red troncal plantean el problema como una asignación de flujos entre puntos origen y final, sin determinar cómo se articulan las cadenas de viajes y las rutas de cada vehículo (Aykin, 1995a). Estas rutas se pueden encaminar entre dos terminales consideradas *hub*, entre una terminal estándar y una *hub* o entre dos terminales estándar sin consolidación ni rotura de carga. Los modelos de programación matemática no lineal para la localización de *hubs* y asignación de envíos entre terminales parten de unos costes kilométricos conocidos e independientes entre sí para cada par de terminales (O'Kelly, 1987). La estructura de rutas y la formulación de costes son en todos los casos independientes del número de vehículos utilizados (son un valor medio de todo el sistema) y no permiten que la capacidad de los vehículos pueda ser optimizada con estrategias más flexibles. De este modo, estas consideraciones impiden poder valorar la implantación de estrategias de paradas múltiples (*peddling*) en la red troncal entre terminales que puede resultar una práctica eficiente en escenarios donde los terminales pueden ser servidos por vehículos con costes de parada no significativos. En este sentido, las principales empresas de paquetería ya están adoptando esta estrategia en su operativa en casos particulares aunque sin la determinación de unos criterios científicos de aplicación.

No obstante, en las contribuciones desarrolladas para problemas de distribución en la red capilar como el *Vehicle Routing Problem* (resolución del problema de rutas de una delegación o almacén a  $m$  clientes finales) se han desarrollado unos algoritmos metaheurísticos que han dado unos resultados diferenciales con el resto de herramientas de cálculo, especialmente el algoritmo de Búsqueda Tabú (TS). Estos algoritmos están basados en un procedimiento de refinamiento iterativo basados en movimientos o transiciones en la solución actual regidas por criterios probabilísticos. En este sentido, en el presente documento se analizará la aplicación del algoritmo de TS en el problema de envíos de muchos orígenes a muchos envíos para validar las potencialidades de optimización demostradas en otros problemas de la optimización combinatoria.

Finalmente, se debe considerar que las contribuciones plantean un escenario estático de tráfico en la red y suponen que las calles y viales por las que se efectuará la operación permiten una circulación libre de los vehículos. Sin embargo, los escenarios metropolitanos donde se efectúa la distribución presentan fenómenos de congestión muy marcados, con velocidades de circulación bajas y problemas de carga y descarga, que se alejan de las condiciones para las que se había planificado la distribución. Este hecho, produce unos sobrecostes a las empresas de paquetería muy significativos. No obstante, no existen aportaciones que hayan valorado el efecto cuantitativo de la congestión en estas empresas de transporte. En este sentido, es necesario el desarrollo de herramientas que valoren los costes esperados derivados de la congestión de modo que permitan discriminar estructuras de distribución ineficientes de las que se realizan de forma óptima aun estando en entornos metropolitanos congestionados.

## **DESCRIPCIÓN DE LOS OBJETIVOS DE LA TESIS**

El objetivo principal de esta tesis es el desarrollo de una herramienta de optimización matemática para el problema de distribución de mercancía de muchos orígenes a muchos destinos. La formulación del problema considerará la presencia de terminales de consolidación de carga (hubs) y se reproducirán las rutas de distribución con el fin de poder establecer estrategias de envíos con paradas múltiples y así optimizar la carga de los vehículos. La herramienta de optimización se basará en un procedimiento heurístico complementado con un proceso de refinamiento de la solución. La etapa de refinamiento se realizará con la adaptación del algoritmo metaheurístico de la Búsqueda Tabú al problema en cuestión, en el que se calibrarán los distintos parámetros para conseguir el mejor equilibrio entre optimalidad de la solución y tiempo computacional.

El segundo objetivo de la tesis es la realización de una guía de diseño para empresas de paquetería industrial que determine el número óptimo de centros de consolidación, su jerarquía y la asignación de los flujos de mercancía a la red, considerando su influencia en las rutas puerta a puerta. Esta guía de diseño se desarrollará por medio de soluciones analíticas de modelos matemáticos así como con los resultados empíricos derivados de la aplicación del algoritmo metaheurístico a unas baterías de problemas de análisis. La guía de diseño también se enfocará a la identificación de los escenarios óptimos de aplicación de la estrategia de envío *peddling* en las redes de distribución entre muchos orígenes y muchos destinos.

Finalmente otro objetivo de la tesis es el análisis y valoración de los sobrecostes de distribución derivados exclusivamente de la congestión; así como la identificación de actuaciones eficientes en estos contextos. El efecto de la congestión se analizará tanto a nivel microscópico en cada terminal e instalación fija por la concurrencia de la propia flota de

distribución en horas punta como a nivel generalizado en toda la red viaria por efecto de episodios de congestión en las vías de comunicación entre las terminales de un territorio.

## **ESTRUCTURA DE LA TESIS**

El contenido de este documento se ha articulado en 8 capítulos que se relacionan a continuación.

El capítulo 1 integra las consideraciones principales sobre estructura, planificación y operativa de redes de transporte de mercancías especialmente enfocadas al problema de muchos orígenes a muchos destinos. Se analizan básicamente los elementos que intervienen en la red y las operaciones que se efectúan con una evaluación detallada de sus costes asociados.

En el capítulo 2 se revisan las distintas contribuciones relevantes sobre metodologías y herramientas de localización de terminales de consolidación y diseño de rutas de transporte en redes de muchos orígenes y muchos destinos. Adicionalmente, también se analiza la producción científica enfocada a la aplicación de técnicas metaheurísticas en problemas de optimización combinatoria.

La formulación del problema de optimización como un modelo de programación matemática entera se aborda en el capítulo 3. En esta fase se definirán las variables de decisión que intervienen y las distintas ecuaciones que permitan reproducir los elementos, las restricciones, las operaciones y costes asociados del sistema de distribución real.

El desarrollo de la herramienta matemática de optimización del problema planteado se realizará en el capítulo 4. La resolución del problema se dividirá en dos subproblemas dependiendo de la relación entre la cantidad de mercancía de cada envío y la capacidad del vehículo expresada en unidades de volumen. El capítulo incluirá la descripción detallada de los algoritmos heurísticos utilizados en las distintas fases de resolución, la adaptación del algoritmo de Búsqueda Tabú y la calibración y ajuste de parámetros. Adicionalmente, se adjunta un planteamiento para la aplicación eficiente de envíos con paradas múltiples en las rutas con muchos orígenes y muchos destinos.

El grado de optimización y comportamiento de la herramienta se valorará en el capítulo 5. La herramienta de optimización desarrollada se aplicará a un conjunto de baterías de problemas que servirán para determinar comparativamente su eficiencia y la *performance* diferencial en distintos escenarios o problemas tipo. Los problemas más complejos están basados en datos reales de empresas del sector.

En el capítulo 6 se analizará la sensibilidad de los costes de distribución a distintos parámetros del sistema. Los resultados obtenidos servirán para desarrollar una guía de diseño de rutas de transporte en esta tipología de redes que analice principalmente los siguientes aspectos: estimación del coste de distribución por medio de funciones analíticas, determinación del número de hubs óptimo, determinación del tamaño de vehículo óptimo y condiciones para la realización eficiente de un envío con paradas múltiples.

El capítulo 7 integrará un análisis de los efectos de la congestión en las rutas de distribución evaluando los costes de espera en las terminales así como los sobrecostes derivados de la pérdida de velocidad de circulación de los vehículos al cubrir las rutas de distribución.

Finalmente, el capítulo 8 incluirá las conclusiones más significativas derivadas de la tesis así como las líneas de investigación futura.