

1. REDES DE DISTRIBUCIÓN

Las redes de transporte de mercancías surgen por la necesidad de conectar y transportar los bienes de consumo desde su punto de producción (localización empresa) hasta el mercado (clientes). En la fase de distribución, la mercancía puede ser transportada con una gran variedad de modos de transporte (por ferrocarril, transporte aéreo, marítimo, fluvial o por carretera) y puede realizar varias paradas en almacenes o nodos de cambio modal hasta llegar a su destino final.

La configuración de la red de transporte condiciona los costes de distribución de la mercancía así como la planificación y organización temporal de la cadena de suministro de los productos al mercado.

Un hecho que ha caracterizado el sistema de transporte de mercancías ha sido el nacimiento de empresas dedicadas exclusivamente a los servicios de transporte, los operadores logísticos (*third part logistics*). En las redes de distribución tradicionales, la empresa de producción organiza y gestiona su propia red de transporte, de forma que realiza los envíos de transporte desde un número limitado de sus plantas de producción hasta cada cliente o mercado. Sin embargo, las ineficiencias de estas redes por las asimetrías de los envíos, su variación temporal o los altos costes de inversión necesarios para vehículos o recursos han producido la externalización de la distribución de sus productos a terceras empresas. Estas empresas subcontratadas prestarán sus servicios de transporte y distribución a varias empresas de producción, por lo que un mismo trayecto o ruta de transporte podrá ser compartido por varios clientes. El efecto directo de este modo de operación y servicio es la posibilidad de consolidar una mayor cantidad de carga en cada ruta de la red, por lo que es factible utilizar vehículos de gran capacidad y con costes unitarios menores.

En este sentido, en Crainic (2003) se plantea una posible clasificación de las redes y servicios de transporte según las posibilidades de consolidación de los envíos en un mismo vehículo. Los servicios o envíos adaptados a un cliente (“*customizados*”) son propiamente servicios de transporte puerta a puerta, en que toda la mercancía comparte el mismo origen o el mismo destino. En esta tipología de servicios y redes, la planificación temporal e intervalos de envío suele ajustarse para que la totalidad de la capacidad del vehículo sea ocupada por la mercancía o envío en cuestión. Esta tipología de servicios se suele conocer como *Full TruckLoad*, (FTL). Estos servicios se consideran como un problema de gestión dinámica de los recursos, ya que resulta difícil llegar a prever y ajustar temporalmente las demandas y solicitudes de envío. Un problema específico de estas redes son los retornos en vacío del punto de destino al origen, que constituyen una actividad con coste elevado pero sin ninguna productividad para la empresa de transporte.

En segundo lugar, existen algunas empresas de transporte que presentan específicamente la característica de ofrecer un servicio de transporte consolidado. En estos casos, el ajuste temporal de los servicios de transporte ya no se hace específicamente para cada cliente. Estas empresas fijan unos plazos de distribución de la mercancía o unos horarios de envío fijos, que se determinan con el objetivo de cumplir con las expectativas y preferencias del máximo número de clientes. En este contexto, se debe establecer un diseño de rutas y paradas acordes con la demanda, de forma que las capacidades de los vehículos sean adecuadas para garantizar la rentabilidad del sistema. Esta tipología de servicios se denomina *Less-Than TruckLoad* (LTL), ya que el tamaño de la mercancía o envío de un solo cliente es muy inferior a la capacidad del vehículo de transporte. Por tanto, es necesario que cada viaje del vehículo sea cargado con envíos de múltiples clientes para incrementar su ocupación. En estos casos, es muy frecuente que estas empresas dispongan de instalaciones propias para la consolidación de los envíos. Estas terminales donde la mercancía realiza una parada para cambiar de vehículo y proseguir su transporte hasta el punto final se denominan terminales *hub* o de consolidación.

Con todo, las empresas que ofrecen servicios de transporte y operadores logísticos se pueden clasificar según otros criterios como la tipología de servicio, número de clientes y plazo temporal para realizar la distribución.

Por un lado se encuentran las empresas de paquetería industrial y paquetería urgente o courier (*second part logistics*, 2PL). Estas empresas únicamente ofrecen servicios de transporte de mercancía, de volumen reducido y con plazos temporales de entrega relativamente cortos. Debido al poco volumen de la carga asociada a un cliente, las operaciones de consolidación resultan un factor estratégico para garantizar su competitividad. Las empresas de paquetería industrial transportan envíos constituidos por distintas tipologías de productos, de densidades variables, con unos plazos fijos entre los orígenes y destinos de la red. Éstas pueden

transportar cualquier tipo de producto de consumo con un empaquetado adecuado. Paralelamente se encuentran las empresas de paquetería urgente o courier, cuyo objeto de negocio es el transporte urgente de carga de tamaño muy reducido, eminentemente pequeñas cajas, documentación y correspondencia con unos plazos de entrega muy restrictivos.

Por su parte, los operadores logísticos pueden ofrecer los servicios de almacenaje, empaquetado y otros servicios de valor añadido conjuntamente con el servicio de transporte y distribución. Aquellas empresas de transporte que prestan este tipo de servicios constituyen el grupo conocido *third part logistics* (3PL). Estos operadores logísticos suelen tener una relación más estrecha con los clientes, de forma que pueden llegar a regular y controlar los ritmos de producción y la facturación de las empresas de producción. Los volúmenes de transporte tienen una magnitud superior a los de paquetería y utilizan una amplia gama de modos de transporte para su distribución. En este caso, el proceso de consolidación se realiza en los modos de transporte de mayor capacidad (ferrocarril, marítimo) en la larga distancia, y utilizan el camión para la última fase de la cadena de transporte. Por último, hoy en día se han desarrollado los operadores logísticos conocidos por el nombre de *fourth part logistics* (4PL). En estos casos, el operador logístico y la empresa de distribución desarrollan una alianza estratégica de modo que ambas comparten riesgos y beneficios de toda la cadena de suministro de los productos.

1.1. COSTES DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN

Los costes de distribución suelen representar una componente significativa del coste total de producción de un bien de consumo, variando en función de su naturaleza. En Martínez y Barea (2001) se argumenta que los costes logísticos representan entre el 10% (en productos tecnológicos) y el 60 % (en productos lácteos o derivados) del coste global.

De este modo, se justifica la necesidad de creación de una red de distribución de los productos de consumo eficiente para garantizar la competitividad de las empresas de producción.

Para poder realizar el diseño y planificación de una red y asegurar un nivel de servicio con la utilización de los mínimos recursos, es necesario abordar los elementos de los que dependen los costes de distribución. Estos elementos son los vehículos de transporte, las instalaciones fijas (almacenes, delegaciones, terminales de consolidación, terminales multimodales), y la propia mercancía transportada. Cada uno de estos términos tiene un conjunto de costes asociados que justificará la adopción de un diseño de red y estrategias de envío específico.

Actualmente, los productos de distribución movilizados por las empresas de paquetería presentan una densidad media relativamente baja. Esta característica, conjuntamente con el volumen perdido por el empaquetado y espacios vacíos entre los bultos o unidades de transporte hacen que el elemento restrictivo para el transporte sea el volumen máximo de mercancía a transportar. De este modo, los costes unitarios asociados a la mercancía se expresarán por unidad de volumen transportada. En algunos casos de paquetería industrial al sector secundario, la capacidad de transporte de los vehículos está condicionada por la variable peso. Sin embargo, en estos casos, el número de envíos realizado por un vehículo no es relevante, y por lo tanto constituye un problema eminentemente FTL de baja complejidad de resolución.

Los vehículos de transporte tendrán asociadas dos componentes de coste en función de sus características físicas y operacionales. Por un lado, existirá un coste kilométrico c_d que integrará el coste de carburante, lubricante y el mantenimiento del vehículo (y en un futuro, posibles tasas por uso de la infraestructura con el objetivo de internalizar externalidades). En segundo lugar, el vehículo tendrá asociado un coste fijo F a escala diaria que representará el coste del personal de conducción, seguros y la amortización del vehículo (en caso de ser flota propia) o alquiler del vehículo (subcontratación); ante futuras tasas por uso de la infraestructura con una componente fija, ésta se incluirá en F .

Desde la perspectiva de las instalaciones fijas, se puede considerar un coste fijo de manipulación por unidad de tiempo c_t^o y un coste unitario c_t de manipulación por volumen de mercancía gestionada. Este coste de manipulación también podría integrar operaciones auxiliares como empaquetamiento y otros tratamientos de la mercancía por un correcto envío desde la delegación. Adicionalmente, también se debe incluir un coste unitario c_r que represente el alquiler de la delegación por volumen de mercancía transportada ($\text{€}/[\text{vol} \cdot \text{tiempo}]$) y el coste fijo c_r^o que representaría el alquiler mínimo por delegación.

La visita de las instalaciones fijas por parte de los vehículos también suelen generar un coste de parada c_p debido a las operaciones y pérdida de productividad de los vehículos en estos nodos.

Finalmente, la mercancía propiamente presenta unos costes temporales debido a la depreciación del producto durante el tiempo en que los envíos están almacenados en las instalaciones fijas o están siendo transportados. En el caso de componentes tecnológicos, sanitarios o productos perecederos su valor puede ser muy significativo y justificar redes de transporte de alto coste pero con plazos de entrega reducidos. Estos costes se integran en el coeficiente de coste unitario de inventario c_i por unidad de volumen de mercancía y tiempo.

En el caso de utilizar una flota de vehículos externa (*outsourcing*), el coste de inventario no se repercutirá directamente a la empresa de paquetería sino que se le exigirá en forma de un plazo de entrega muy reducido. Por lo tanto, el valor del coste de inventario de una mercancía condicionará de forma relevante el plazo de entrega en la red de distribución.

1.2. ESTRUCTURA DE UNA RED DE PAQUETERÍA INDUSTRIAL

La multiplicidad de clientes servidos por las empresas de paquetería ha permitido la concentración de envíos en las terminales de consolidación de carga para poder desarrollar economías de escala utilizando vehículos de mayor capacidad y menor coste unitario.

La creación de estos centros de consolidación ha provocado que el sistema de distribución se presente jerarquizado en una serie de almacenes, delegaciones y terminales de consolidación de tamaños y características diferentes entre sí. Cada instalación fija tiene una función u objetivo en la cadena de distribución que lo difiere de los demás. Las delegaciones o almacenes locales distribuidos en todo un territorio son los puntos básicos desde los cuales la mercancía se encamina hacia el cliente final (o en el caso de entregas, la mercancía se transporta a la delegación desde el cliente que ha solicitado el servicio). Cada delegación presta servicio y consolida la mercancía de los clientes ubicados en una zona de servicio definida geográficamente.

Este hecho obliga a una clasificación jerárquica de la red de transporte de las empresas de paquetería en dos grupos diferenciados (ver Figura 1.1) tal y como se argumenta en Crainic (2003):

- la red troncal o entre delegaciones (*line-haul*), que se compone de aquellas rutas y vehículos que comunican únicamente las distintas delegaciones entre sí, sin servir directamente a los clientes. Los vehículos destinados a operar en esta red son de gran capacidad para aprovechar las economías de escala que permite la consolidación de los envíos en puntos estratégicos de la red. Adicionalmente, las rutas de estos vehículos suelen superar una gran distancia y presentan un número de paradas reducido (normalmente efectúan una sola parada en la delegación de destino).
- la red capilar, que se compone de las rutas y vehículos que efectúan el reparto de la mercancía desde las delegaciones a los clientes finales (en el caso de envíos, las rutas se configuran en sentido inverso). En este contexto, las rutas asociadas a esta red suelen presentar un número significativo de paradas en clientes y se circunscriben únicamente en el territorio contiguo a la delegación asociada (ver Golden y Asad, 1988).

De este modo, un servicio típico realizado por una empresa de paquetería es el envío de un volumen V de mercancía entre dos nodos clientes i, j del territorio. La primera fase del encaminamiento del envío entre su origen y su destino se efectuará por medio de la red capilar, donde un vehículo transportará el volumen de la mercancía a la delegación I de la red troncal a la que el cliente i está asociado. Posteriormente, la segunda fase es el transporte a larga distancia del envío entre las delegaciones I y J a la que están asociados los puntos origen y destino respectivamente. La tercera etapa del encaminamiento consta del transporte del envío desde la delegación J al cliente final j con un vehículo y ruta perteneciente a la red capilar. La curva de costes de transporte acumulada a lo largo de la distancia entre los puntos i, j se representan en la Figura 1.2.

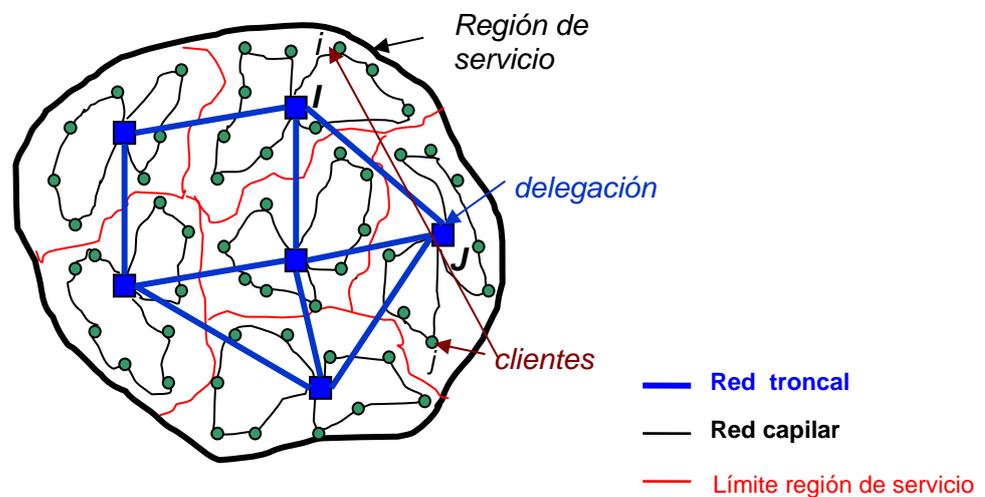


Fig. 1.1. Red de transporte de una empresa de paquetería industrial

En la red troncal existen ocasiones en que las mercancías u objetos no se transportan directamente entre delegaciones en todo un territorio de servicio. En estos casos la mercancía se transporta hacia unos puntos preferentes de la red donde se agrupa la carga de una región de servicio con el fin de constituir vehículos de gran capacidad con unos destinos comunes.

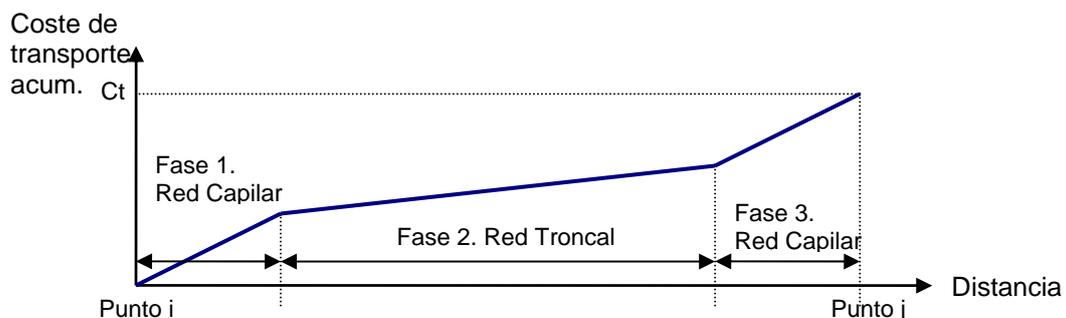


Fig. 1.2. Coste de transporte en las distintas etapas de un envío (i, j)

En este sentido, los *hubs* son terminales de consolidación y ruptura de la carga que procede de multiplicidad de orígenes y que se encamina hacia múltiples destinos. Esta estrategia de distribución aprovecha las economías de escala derivadas de la consolidación de cargas. El objetivo de la consolidación en un *hub* es el equilibrio entre el incremento del factor de carga del vehículo hacia un mismo destino (reducción de costes unitarios de transporte) con el incremento de la distancia que conlleva en relación al envío directo. La implantación de los *hubs* surgió a principios de los años 80 en EE.UU., en el área del transporte aéreo de pasajeros y de mercancías como resultado de la desregularización del tráfico aéreo. En especial, tal y como se detalla en el artículo de Hall (1989) la empresa Federal Express estableció un centro de consolidación de carga aérea en Memphis y una red de distribución puerta a puerta completa en todo el país que regulaba la distribución de envíos durante la noche en todo el territorio nacional. Si bien esta estructura se completó con otros nodos singulares llamados *minihubs*, se estableció un sistema de distribución que ha prevalecido en el tiempo y que ha conllevado reducciones de costes importantes y nuevas posibilidades.

En la estructura física de las empresas de paquetería existen terminales de consolidación de nivel continental que sirven un gran territorio y *hubs* de nivel inferior. En otro nivel, se identifican *hubs* nacionales ligados a las infraestructuras básicas de conexión estatal y los *hubs* regionales cuyo tamaño depende de la región de servicio y demanda que se le ha asignado.

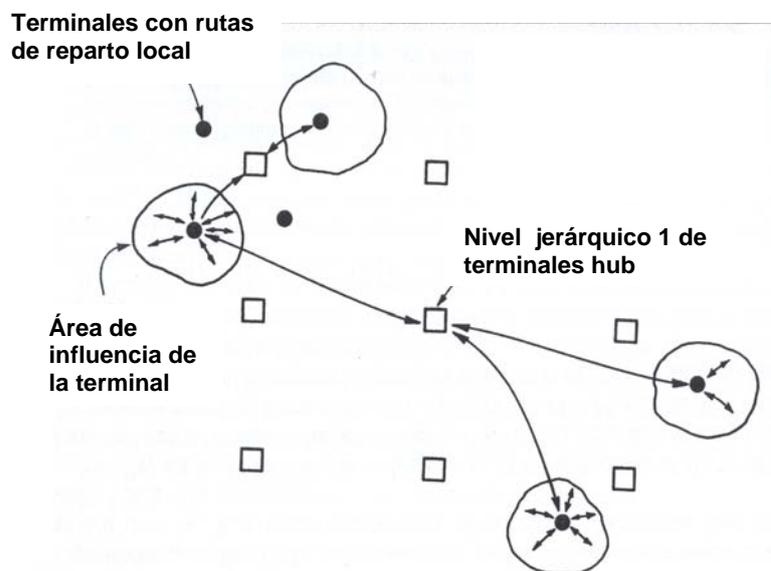


Fig. 1.3. Esquema del sistema de distribución entre delegaciones con rutas de distribución local y hubs.
Fuente: Daganzo (2005)

Un sistema de distribución *many-to-many* debe tener una configuración en las que aparezcan tanto delegaciones que actúan como centros de distribución a la red local como terminales de consolidación *hub*. Ambas desarrollan la estrategia de consolidación de la carga a distintas

Los modelos basados en los flujos de transporte permiten cuantificar la cantidad de envío entre dos zonas de un territorio independientemente de la ruta realizada, reproduciendo de forma adecuada la razón económica de los envíos. Estos modelos, como se detalla en la Figura 1.4, permiten seguir el proceso real de la conformación de un envío entre un origen y un destino especificado y son capaces de modelizar un sistema multimodal. La mayor deficiencia que presentan es la necesidad de disponer de datos reales de flujos O-D entre regiones o zonas de transporte y la incapacidad de cuantificar los envíos en vacío o de retorno.

Por otro lado, existen los modelos basados en rutas o viajes de vehículos que presentan como mayor potencialidad la facilidad de calibración al disponer de datos reales mediante aforos. Las mayores dificultades planteadas en el seno de este grupo según Holguín (2007) recaen en la dificultad de modelizar sistemas multimodales, la dificultad de determinar el grado de asignación de la carga entre vehículos y competitividad entre empresas, y finalmente la incapacidad de relacionar o caracterizar la naturaleza de las cargas.

Dentro de los modelos de planificación del transporte de mercancías, las contribuciones de modelos se han articulado hacia dos caminos principales. En un primer grupo, se han desarrollado modelos con el objetivo de caracterizar la localización óptima de terminales y redes de transporte y otros modelos basados en la asignación y encaminamiento ‘óptimo de envíos a rutas.

Los modelos de localización de *hubs* y terminales suelen presentarse como problemas basados en flujos ya que la ubicación de los *hubs* se realiza en función de la demanda O-D, independientemente de las rutas de vehículos. En este caso no se considerarán problemas del tipo *single commodity problems* donde cada destino especifica una demanda combinada independiente de los puntos de origen (ejemplos: suministro de agua y de electricidad). Estos tipos de problemas pueden ser reducidos a problemas *One to Many*, es decir la distribución de un solo punto a muchos puntos. En el caso de las empresas de paquetería el objeto de transporte (carga a transportar) tiene un origen y destino especificado de antemano que los diferencian de la categoría de problemas anteriormente citada.

Los primeros análisis de la localización de almacenes y centros de producción (*facilities*) con la determinación de flujos fijos de mercancía entre estos puntos se iniciaron en los años 80 (ver Larson y Odoni, 1981) con estudios acerca de:

- Problemas de localización de multicentros
- Problemas de p -medianas y p -centros de comunicación mutua

Los análisis anteriores sólo consideraban la localización de terminales (*facilities*) y asignación de puntos con flujos que no interaccionaban entre sí. En estos casos, una vez se determinaba una partición del área de servicio en distritos asignados a cada delegación, no había flujos de mercancía entre distritos. Es el problema más sencillo que se plantea ya que no existe ningún tipo de transporte entre los distintos *hubs*.

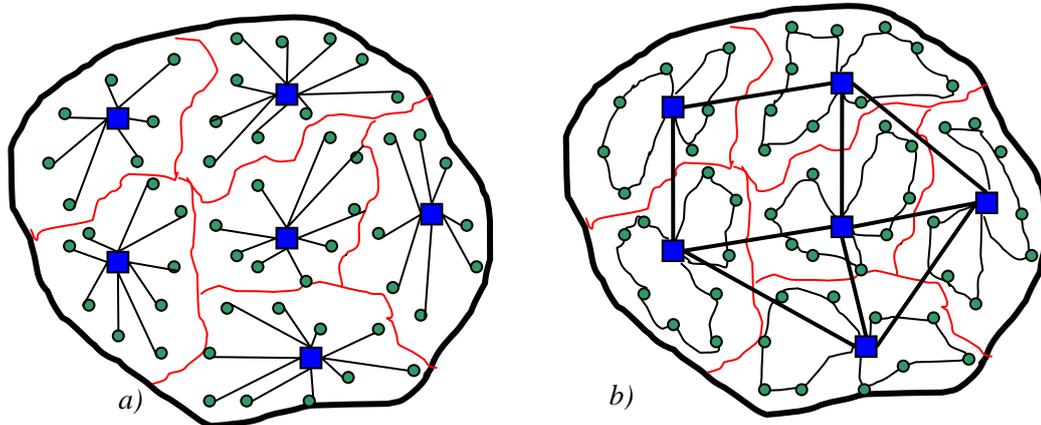


Fig. 1.5. a) Proceso de localización de instalaciones de servicio (*facilities*) con flujos fijos b) Proceso de localización de instalaciones teniendo en cuenta los orígenes y destinos de la mercancía a transportar

Sin embargo, en la planificación de rutas de servicio de paquetería terrestre o en la aviación en general, los desplazamientos de personas o mercancías entre un origen y un destino fijos incluyen puntos de consolidación de carga o pasajeros. Por lo tanto, es necesario contemplar la cadena de transporte utilizada para superar la distancia entre el origen y su destino así como las paradas en las terminales de consolidación para poder analizar estos tipos de problemas.

La clasificación de los problemas de localización se establece en Handler & Mirchandani (1979) y quedaría definida por los siguientes criterios:

- Función objetivo:
 - Minisum
 - Terminales centrales
 - Problemas de cobertura
 - Criterio múltiple
- Número de terminales
 - Una terminal
 - Varias terminales
- Tipo de red
 - Red determinística vs. Probabilística
 - Red orientada vs. No orientada
 - Redes cíclicas vs. Redes acíclicas

- Puntos de demanda
 - Sólo en nodos
 - En cualquier lugar de la red

- Posibilidad de ubicar terminales
 - Solo se pueden ubicar en un conjunto finito de nodos determinados (localización discreta)
 - Se pueden ubicar en cualquier nodo (localización continua)

En Rodríguez (2002) se analiza la complejidad del diseño de rutas en una red de n nodos en función de las paradas permitidas por una empresa de distribución. En particular, en una red de n nodos y con un número k de paradas intermedias admitidas entre dos puntos i, j de la red, el número global de posibilidades de ruta está determinado por el total de subconjuntos de k nodos dentro de los $n-2$ nodos restantes de la red. En este caso el número de rutas posibles para llevar la carga desde i hasta j haciendo k paradas intermedias es:

$$C_{n-2,k} = \frac{(n-2)!}{k!(n-2-k)!} \quad (1.1)$$

En este contexto, el total de rutas posibles en la red sería de:

$$C_{n,2} \cdot C_{(n-2),k} = \frac{n!}{2(n-k)!} \frac{(n-2)!}{k!(n-2-k)!} \quad (1.2)$$

En este sentido, la verificación o enumeración de todas las posibilidades de ruta para la determinación de la mejor solución es inabordable. Sin embargo, tal y como se manifiesta en Aykin (1995b), el número de paradas máximo se suele limitar a 1 ó 2 paradas en *hubs* para poder cumplir los plazos de entrega. El hecho de admitir un número de paradas superior impediría que se llegara en un tiempo adecuado en los puntos más alejados del origen.

La determinación y diseño de las rutas de distribución parte de una estructura fija de *hubs*. En este sentido, todas las metodologías que abordan la determinación de una red de distribución eficiente, articulan el estudio en una fase secuencial que en primer lugar localizan los nodos considerados como *hubs* y posteriormente diseñan las rutas y los encaminamientos de la mercancía.

Una vez determinada la localización de los *hubs*, el problema de diseño de rutas de reparto se basa en la asignación de todas las delegaciones a uno de los *hubs* de la zona de servicio. Algunos investigadores han analizado las potencialidades de poder asignar un nodo a más de

un *hub*. A partir de esta asignación, el problema de optimización de rutas de distribución se basa en identificar para cada par origen y destino las rutas que conectan sus *hubs* asociados con cada uno de los nodos O-D en base a distintos criterios. En esta fase, existen distintos investigadores que han comparado las potencialidades entre los envíos directos entre los puntos O-D o a partir del encaminamiento a través de un *hub* (Blumenfeld et al 1985). En Hall (1987) y (1996) también se analizan los casos en que es más rentable encaminar una mercancía a través de un *hub* considerando una red con pocos orígenes y múltiples destinos.

1.3. TIPOLOGIAS DE ESTRATEGIAS DE ENVÍO

La demanda de servicio en un territorio influye directamente en las estrategias a seguir para cubrir los puntos de demanda y en consecuencia, la topología de la red de almacenes, centros de consolidación y delegaciones de la empresa logística. La estrategia óptima a aplicar en un sistema de distribución debe responder a un balance de los distintos costes logísticos que actúan: los costes de transporte, costes de inventario (fijos o en tránsito) y costes de manipulación y de amortización asociados a los almacenes y centros de consolidación.

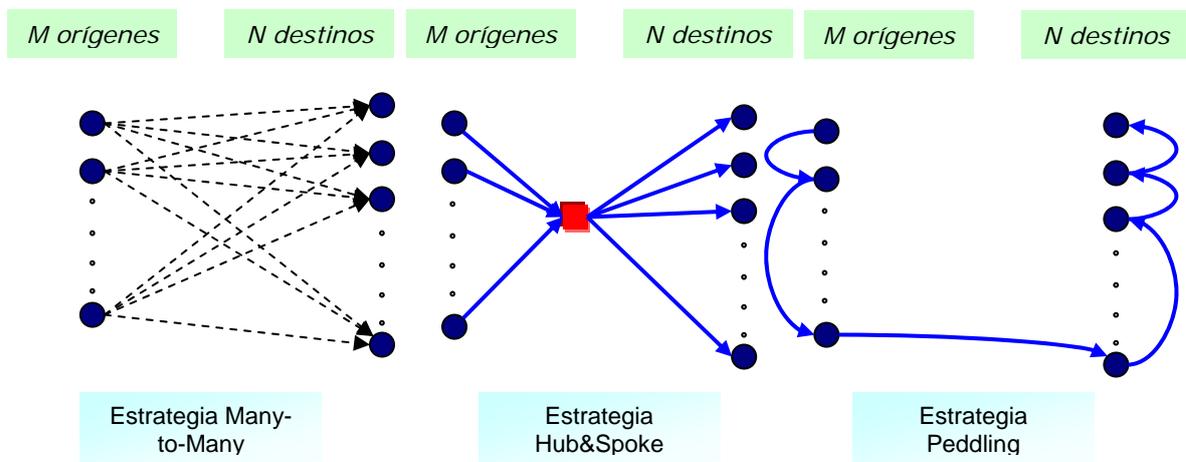


Fig. 1.6. Estrategias básicas cuya combinación permiten planificar un sistema de distribución

Con todo, las estrategias básicas cuya combinación permiten planificar un sistema de distribución física se ilustran en la Figura 1.6. y se resumen en:

- Envíos directos (*many-to-many*):** Esta estrategia comporta una distancia a recorrer significativa y un alto número de vehículos para efectuar la distribución, por lo que únicamente se considera cuando los costes de servicio del vehículo F son reducidos,

cuando la demanda asociada entre todos los puntos origen-destino puede llenar la capacidad del vehículo o cuando las restricciones temporales sean importantes.

- b. **Envíos *hub-&-spoke***. La construcción de centros de consolidación de carga (*hubs*) comporta la concentración de la mercancía en estos puntos y la optimización de la capacidad de los vehículos en escenarios con una distribución espacial de demanda no uniforme. Esta estrategia permite incrementar el factor de carga de los vehículos y en consecuencia, se reduce el coste unitario de transporte a nivel general de toda la red así como el tiempo total de la distribución.
- c. **Envíos con paradas múltiples**. La aplicación de esta estrategia comporta comparativamente un número reducido de rutas compuestas por un alto número de paradas en cada una de ellas. Su aplicación se puede llevar a cabo cuando el coste y el tiempo para realizar una parada adicional en una ruta es reducido y en escenarios con costes de de servicio de vehículo (F) relativamente altos.

En Burns et al. (1985) y Hall (1987) se analizan las distintas estrategias para llevar a cabo la distribución de la mercancía desde un punto de producción a distintos clientes de una región de servicio mediante un envío directo y una estrategia de paradas múltiples. En ambas estrategias se relaciona comparativamente la variable de decisión *tamaño de envío*, para la cual se calculan valores óptimos. Estas estrategias serán desarrolladas ampliamente en los subcapítulos 1.3.1. - 1.3.3.

1.3.1. Envíos directos

En Burns et al. (1985) se determina la estructura de costes de transporte de los envíos directos en los que únicamente se realiza una parada por mercancía, de modo que el coste de transporte por envío (F) se puede descomponer en distintos términos y expresarlo como coste unitario según la expresión (1.3),

$$z_t = \frac{F}{V} = \frac{\gamma + \sigma + \alpha D}{V} \quad (1.3)$$

donde γ es el coste fijo de iniciar un envío (€/carga), σ el coste fijo de una parada (€/parada), α el coste de transporte por unidad de longitud (€/km), D la distancia del envío entre el punto de producción y punto de entrega y V el tamaño del envío (unidades de mercancía/carga). Como se puede constatar, el coste de transporte se reduce en relación al tamaño del envío, reflejando las posibles economías de escala en los envíos.

En relación con los costes de inventario, éstos dependen del tiempo transcurrido entre la producción y su consumo por los clientes. Si se consideran las siguientes variables:

Q = flujo (ton/día)

τ = tiempo de viaje a través del arco (día)

R = precio del dinero del material en inventario (€/€-día)

P = valor de la unidad de mercancía transportada (€/tonelada)

W = capacidad del vehículo de transporte (ton)

De esta forma, el coste total del envío incluyendo el coste de inventario en origen, en destino y en tránsito y sin considerar el coste de la mercancía (independiente del envío), es:

$$Z = F + PR \left(\frac{V^2}{2Q} + V\tau + \frac{V^2}{2Q} \right) \quad (1.4)$$

La función objetivo del problema que se pretende analizar es el coste unitario por objeto enviado, detallado en la ecuación (1.5).

$$z = \frac{F}{V} + PR \left(\tau + \frac{V}{Q} \right) \quad (1.5)$$

El valor del tamaño óptimo de envío que minimiza la función de coste unitario de distribución por objeto enviado (1.5) en un solo arco de la red es:

$$V^* = \min \left\{ \sqrt{FQ/RP}; W \right\} \quad (1.6)$$

La expresión (1.6) indica que el valor óptimo del tamaño de envío, V^* , crece respecto a la relación entre el coste fijo de transporte F y el coste de inventario de una unidad de carga para un periodo $1/Q$. De este modo, V^* crece con la distancia entre el almacén y el cliente.

El valor óptimo z^* de la expresión (1.5) para V^* decrece con el flujo Q de unidades de mercancía entre el almacén inicial y los clientes. Adicionalmente, el coste total por unidad de tiempo, Qz^* , presenta economías de escala hasta que Q es suficientemente grande para justificar un envío a carga completa. En los envíos a carga completa el flujo transportado es $Q=PRW^2/F$. La importante relación de concavidad entre Qz^* con Q es ignorada cuando se utiliza la programación lineal para modelizar la asignación de flujo a las redes de distribución física.

En particular, la programación lineal optimiza la asignación únicamente cuando los costes son lineales o escalonadamente convexos con el flujo. La suposición de relación lineal únicamente se da para $V^*=W$ y por tanto la programación lineal no consigue el valor óptimo cuando $V^*<W$.

1.3.2. Paradas múltiples

Las variables de decisión en los envíos con paradas múltiples son el tamaño del envío (como sucedía en el caso del envío directo) y el tamaño de la zona de distribución, ya que los costes locales de distribución en este caso no son despreciables.

Costes de transporte de la estrategia de paradas múltiples (*peddling*)

En Burns et al. (1985) la estrategia de paradas múltiples se integra dentro de la ecuación de costes considerando los costes de distribución locales y los costes de acceso (*line-haul*) a la zona de reparto. De esta forma, los costes se determinan en función de las siguientes variables del problema.

- F' Coste total de envío de paradas múltiples por carga (€/carga)
- D' Distancia total del transporte del envío de paradas múltiples (incluye line-haul y distancia local, en km)
- m Número medio de paradas asociadas a clientes por carga
- n Número de clientes por región de distribución (se asocia al tamaño de la región de servicio)
- δ Densidad de clientes (numero de clientes por km²)

En este sentido, los costes totales de envío de paradas múltiples por carga se pueden expresar mediante la expresión (1.7.), donde los parámetros de esta fórmula son los mismos que en la ecuación (1.3).

$$F' = \gamma + \sigma m + \alpha D' \quad (1.7)$$

A nivel general, el número medio de paradas de clientes asociadas por carga, m , depende del tamaño de la región de servicio n y del tamaño del envío V .

Por otro lado, la distancia D' puede ser expresada según la distancia local de distribución y la distancia de acceso (*line-haul*) según las formulaciones detalladas en Daganzo (1988). De este modo, la distancia mínima local que une m clientes distribuidos aleatoriamente en una región de servicio se puede aproximar por la ecuación (1.8),

$$d = K\sqrt{mn/\delta} \quad (1.8)$$

donde K es una constante que depende de la métrica adoptada. En este sentido, la distancia total del envío D' se puede aproximar mediante la ecuación (1.9) suponiendo que D hace referencia a la distancia de acceso a la zona de reparto.

$$D' = D + K\sqrt{mn/\delta} \quad (1.9)$$

De este modo, la distancia recorrida en un envío siguiendo una estrategia *peddling* depende del número de paradas asociados a clientes, m , que puede ser expresada en términos de n y V . Para una región de servicio determinada, la variable q_i representa la cantidad de mercancía demandada por cada cliente i . En este contexto, si la mercancía es enviada desde el origen independientemente de la tasa de consumo en destino, la probabilidad que alguna mercancía de la región de servicio pertenezca al cliente i es $q_i / \sum_{i=1}^n q_i = q_i / nq$, donde q es la demanda media de cada cliente. La probabilidad p_i de que el cliente i tenga al menos una unidad de mercancía en el envío se determina por la ecuación (1.10).

$$p_i = 1 - (1 - q_i / nq)^V \quad (1.10)$$

Por lo tanto, la probabilidad de parar en un cliente escogido aleatoriamente es igual a la fracción esperada de clientes en una región de servicio que reciben mercancía con una carga de tamaño $V=m/n$.

$$\frac{\sum_{i=1}^n [1 - (1 - q_i / nq)^V]}{n} = \frac{m}{n} \quad (1.11)$$

Por lo tanto, los costes unitarios de transporte para una estrategia *peddling* se pueden resumir mediante la expresión (1.12), donde m es determinado mediante la expresión (1.11).

$$C_s = \frac{F'}{V} = \frac{\gamma + \sigma m + \alpha D + \alpha K\sqrt{mn/\delta}}{V} \quad (1.12)$$

Costes de inventario ligados a la estrategia *peddling*

En el desarrollo de los costes de inventario de las estrategias de paradas múltiples se supone como hipótesis que la producción de bienes se organiza de forma independiente de la demanda de clientes y que éstos solicitan múltiplos de una unidad básica de mercancía. Bajo estos supuestos, los costes de inventario dependen del tiempo medio entre la producción y su consumo por un cliente. De esta forma, el tiempo medio en que una unidad de mercancía está

almacenada en origen (espera a ser cargada) y en destino (espera a ser consumida) es $V/2nq$. Adicionalmente, se debe considerar un tiempo en tránsito T en la fase de acceso a la zona de reparto común para toda la carga transportada y un tiempo de tránsito en la etapa de distribución local. La mercancía asociada a la primera entrega no incurre en tiempo de tránsito en la etapa de distribución local, mientras que la mercancía transportada hasta la última parada lleva asociado un tiempo de tránsito local t . De forma general se puede formular un tiempo de tránsito local medio igual a $t/2$. De esta forma, el coste de inventario asociado a la estrategia *peddling* C_I será el producto del valor de la mercancía P , por el precio del dinero R y por el tiempo medio total que la mercancía consume desde la producción hasta su consumo por un cliente τ_p , tal como se refleja en la ecuación (1.13)

$$C_I = PR\tau_p = PR\left(\frac{V}{2nq} + T + \frac{t}{2} + \frac{V}{2nq}\right) \quad (1.13)$$

Sin embargo, en el caso de las empresas de paquetería, el inventario en destino puede ser considerado despreciable. Los clientes optan por el servicio de paquetería industrial o courier para el envío de transportes con unos plazos de entrega exigentes y definidos; por lo tanto se puede asumir que el tiempo transcurrido entre la llegada del envío y su utilización o consumo es irrelevante.

Equilibrio entre costes de transporte y de inventario para las rutas *peddling*

El coste total por unidad de mercancía asociado a la estrategia *peddling* estará constituido por la suma del coste de inventario y el coste de transporte y presenta la formulación analítica de la expresión (1.14),

$$C_T = C_S + C_I = \frac{\gamma + \alpha D + \alpha d + \sigma m}{V} + PR\left(\frac{V}{2nq} + T + \frac{t}{2} + \frac{V}{2nq}\right) \quad (1.14)$$

donde la distancia local de reparto d , y el número esperado m de paradas de clientes están dadas por las ecuaciones (1.8) y (1.11).

En Burns et al. (1985) se analiza el término asociado al tiempo de tránsito local $t/2$, concluyendo que en la mayoría de casos este valor es significativamente menor que el asociado al coste de transporte, por lo que se puede negligir. Paralelamente, en la misma referencia se prueba que el tamaño óptimo de envío en estas condiciones es igual a la capacidad del vehículo, es decir los vehículos deben circular a plena capacidad.

Con estas consideraciones, en la ecuación (1.14) se puede expresar el coste total en función únicamente de la variable de decisión tamaño de la región de servicio n (número de clientes):

$$C_T = PR \left(\frac{W}{nq} + T \right) + \frac{\gamma + \alpha D}{W} + \frac{\alpha K}{W} \sqrt{\frac{mn}{\delta}} + \frac{\sigma m}{W} \quad (1.15)$$

donde el número de paradas medias asociadas a clientes por carga es $m = \sum_{i=1}^n [1 - (1 - q_i / nq)^W]$. Si se supone que todos los clientes solicitan la misma cantidad de mercancía ($q_i = q \forall i$) se puede constatar que m tiende a W cuando el valor de n es significativamente superior a W . Por otro lado, m tiende a n cuando el calor de n es reducido en relación a W .

1.3.3. Envíos a través de una terminal de consolidación. Comparativa con los envíos directos

La elección de la estrategia de distribución de mercancías entre el envío directo entre los puntos origen y destino o a través de una terminal de consolidación de carga (*hub*) es una decisión compleja debido a las economías de escala que se producen en el transporte. El coste del transporte de una mercancía entre dos puntos a través de una terminal de consolidación depende del flujo total de mercancías que se agrupa en ésta y de las rutas de otros envíos. En este sentido, el número de posibilidades a considerar crece exponencialmente con el número de orígenes y destinos de la estructura de distribución. Si M es el número de orígenes y N el número de destinos, existen 2^{MN} posibilidades de envío diferentes (2 para cada par origen-destino).

En Hall (1987) se analiza este problema suponiendo que la función de costes de envío es cóncava, basándose en el modelo *EOQ* (*Economic Order Quantity*). Si se substituye el valor de envío óptimo encontrado en la ecuación (1.6) en la función objetivo de costes unitarios de transporte (1.5), se llega a la formulación del coste de distribución mínimo asociado al problema (ecuación 1.16).

$$Z^* = \left\{ \begin{array}{ll} 2\sqrt{RPF/Q} + RP\tau, & V < W \\ \frac{F}{W} + \frac{RPS}{Q} + RP\tau, & V = W \end{array} \right\} \quad (1.16)$$

Se puede constatar que el coste por objeto enviado disminuye con el flujo de envío. Si se multiplica el coste por objeto Z^* por el flujo de mercancía en aquel arco, Q , se obtiene el coste

total $C(Q)$ en el periodo de estudio, que se caracteriza por ser una función cóncava. De esta forma, el coste marginal de incrementar el flujo Q en un período de tiempo determinado equivale a la derivada de $C(Q)$ en función de Q detallada en la expresión (1.17).

$$\frac{\partial C(Q)}{\partial Q} = \begin{cases} \sqrt{RPF/Q} + RP\tau, & V < S \\ \frac{F}{W} + RP\tau & V = S \end{cases} \quad (1.17)$$

Una de las propiedades de una función de coste crecientemente cóncava, $f(x)$, es que su derivada (su coste marginal) es prácticamente constante para valores altos de x . En el caso de redes de distribución con muchos orígenes y muchos destinos, el flujo entre una terminal y la multiplicidad de destinos es significativo. De este modo, el coste marginal en los arcos entre la terminal y los destinos debería ser constante o insensible a los cambios de flujo (Figura 1.7).

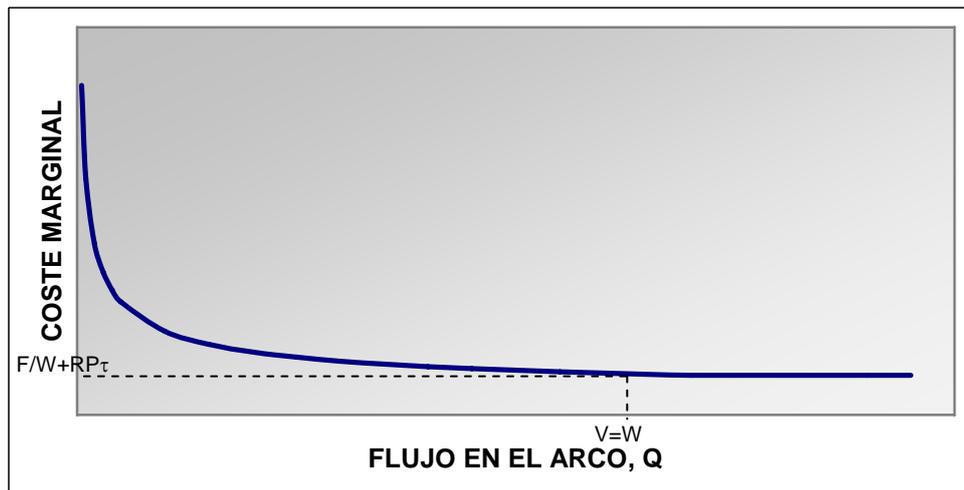


Fig. 1.7 Evolución del coste marginal en función del flujo en el arco

En Blumenfeld *et al.* (1985) se analiza una red con M orígenes y N destinos, asumiendo que el coste marginal de los arcos que conectan la terminal a los puntos de destino es insensible a los cambios de flujo. En este contexto, el análisis de la estrategia más eficiente se puede descomponer en M subredes independientes que tienen como origen la terminal, tal como se refleja en la Figura 1.8. Las estrategias consideradas para realizar un envío entre el origen y un punto destino son el envío directo o el envío con consolidación a una terminal *hub*. Considerando un solo origen, N destinos y nombrando los destinos por $n=1,2,\dots,N$, se puede asumir la siguiente notación:

Q_n = flujo desde el origen al punto n de destino (tonelada/día)

F_n = coste de fletar un vehículo directo desde el origen hasta el punto de destino n .

τ_n = tiempo de viaje directo a través del arco (día)

\bar{Q} = flujo total desde el origen a la terminal (tonelada/día)

\bar{F} = coste de envío de un vehículo desde el origen a la terminal (euros)

$\bar{\tau}$ = tiempo de viaje desde el origen a la terminal (día)

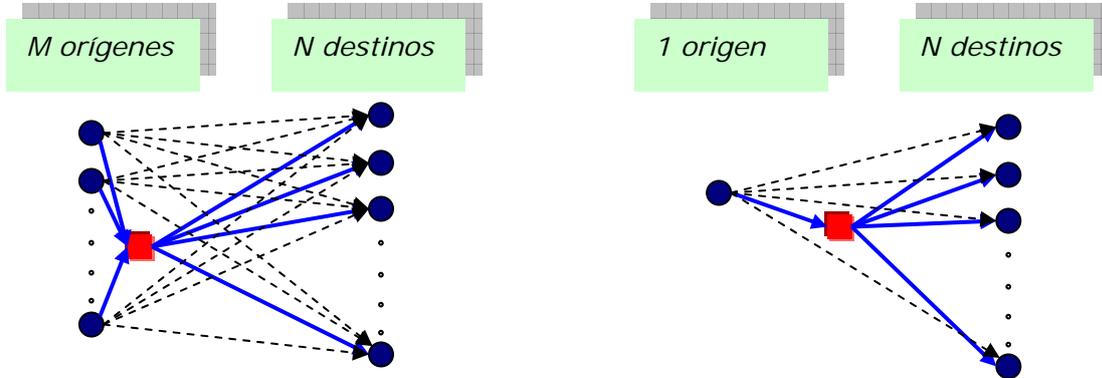


Figura 1.8. Descomposición del problema analítico de envíos directos o envíos mediante una terminal de consolidación de M orígenes a N destinos

Debido a que la función de coste es cóncava en relación al flujo y el flujo por el arco no tiene ninguna restricción de capacidad, la distribución óptima pasará por enviar un solo camión entre el origen y el destino en una estrategia de envío directo (Yaced, 1971). De este modo, el coste total por día $C_n^d(Q_n)$ del envío desde un origen al punto destino n depende únicamente del flujo entre origen-destino y se puede definir por la ecuación (1.18); mientras que el coste total por día del envío desde el origen a la terminal *hub* depende del flujo total entre origen y terminal y se define por la ecuación (1.19).

$$C_n^d(Q_n) = \begin{cases} 2\sqrt{F_n Q_n R P} + R P \tau_n Q_n, & V < W \\ \frac{F_n Q_n}{W} + R P W + R P \tau_n Q_n, & V = W \end{cases} \quad (1.18)$$

$$C^t(Q) = \begin{cases} 2\sqrt{F Q R P} + R P \tau Q, & V < W \\ \frac{F Q}{W} + R P W + R P \tau Q, & V = W \end{cases} \quad (1.19)$$

El coste marginal de envío desde la terminal hasta el punto destino final se asume constante respecto al flujo y se representa por la variable W_n (coste por tonelada incluyendo el transporte desde la terminal hasta el punto destino n , el inventario en tránsito y el coste de tratamiento en la terminal). De este modo, el coste incremental del transporte de una mercancía hasta un punto de destino n por el envío a través de la terminal ($C_n^t(\bar{Q}, Q_n)$) depende de \bar{Q} y Q_n , pudiéndose expresar por la ecuación (1.20).

$$C_n^t(\bar{Q}, Q_n) = C^t(\bar{Q}) - C^t(\bar{Q} - Q_n) + W_n Q_n \quad (1.20)$$

Por lo tanto, para un \bar{Q} dado, la decisión sobre el tipo de envío óptimo se debe realizar comparando el coste de envío directo y el coste incremental del envío al punto n mediante la terminal. Si $C_n^d(Q_n) < C_n^t(\bar{Q}, Q_n)$, el envío directo resultará más económico que el envío a través de la terminal. En este sentido, debido a que el coste de envío a través de la terminal disminuye con aumentos de \bar{Q} , se puede definir un flujo crítico \bar{Q}'_n por el que el coste directo iguala al coste de envío por terminal (ecuación 1.21).

$$C_n^d(Q_n) = C_n^t(\bar{Q}, Q_n) \quad (1.21)$$

Debido que $C_n^t(\bar{Q}, Q_n)$ es cóncava respecto al flujo \bar{Q} , se puede considerar que se cumple la desigualdad (1.22) para todos los valores de \bar{Q} mayores o iguales al valor crítico \bar{Q}'_n .

$$C_n^d(Q_n) \geq C_n^t(\bar{Q}, Q_n) \quad (1.22)$$

Para la función de coste EOQ , el valor mínimo de $C_n^t(\bar{Q}, Q_n)$ se alcanza cuando los vehículos de carga van llenos. De este modo, se puede argumentar que el envío directo siempre se prefiere cuando el coste directo es menor al valor mínimo del coste por terminal, es decir cuando se cumple la desigualdad (1.23).

$$C_n^d(Q_n) < \left[\frac{\bar{F}}{W} + W_n + RP\bar{\tau} \right] Q_n \leq C_n^t(\bar{Q}, Q_n) \quad (1.23)$$

Partiendo que el coste de envío a través de la terminal tiene un valor máximo cuando \bar{Q} es igual a Q_n , se concluye que la distribución a través de la terminal es preferible cuando se cumple la condición (1.24).

$$C_n^d(Q_n) > 2\sqrt{RPFQ_n} + [W_n + RP\bar{\tau}]Q_n \geq C_n^t(\bar{Q}, Q_n) \quad (1.24)$$

Existen casos en que no existe ningún valor crítico del flujo que verifica la igualdad (1.21) y por tanto, el destino n debe ser en todos los casos visitado a través de la terminal o por envío directo.

Los límites (1.23) y (1.24) se ilustran mediante la representación gráfica de la Figura 1.9., donde se representa la curva $\bar{Q}'_n - Q_n$ en relación a Q_n . El flujo hacia todos los destinos a excepción del punto n necesita justificar el ruteo desde la destino n hacia la terminal. Como ejemplo, a medida que Q_n crece, se necesita un flujo hacia el terminal mayor para justificar el ruteo de la terminal. En este sentido, cuando Q_n sea suficientemente grande, el paso por la terminal nunca será recomendable, independientemente del valor de \bar{Q} .

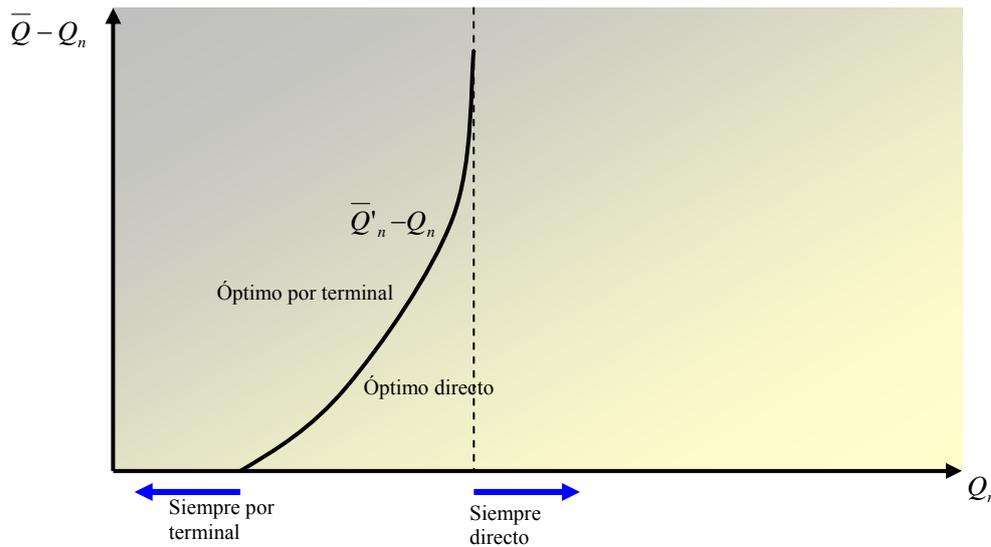


Fig. 1.9. Decisión de envío directo o a través de terminal para todos los destinos

Se ha demostrado que el envío óptimo para un destino determinado n depende del flujo total del arco que conecta el origen a la terminal y su relación con un valor de flujo crítico llamado \bar{Q}'_n . Paralelamente, es interesante determinar un valor óptimo del flujo \bar{Q} en relación a los flujos solicitados por cada destino de forma conjunta.

Si se define la función $N(\bar{Q})$ como el conjunto de destinos que tienen un flujo crítico asociado inferior a \bar{Q} , la variable $Q'(\bar{Q}) = \sum_{N(\bar{Q})} Q_n$ es el flujo combinado a todos los destinos de $N(\bar{Q})$; y representa el flujo de aquellos destinos que deberían ser visitados a través de la terminal si el flujo a través de la terminal llegara a \bar{Q} .

La ecuación (1.25) representa una condición necesaria para que el flujo de la terminal sea óptimo.

$$Q'(\bar{Q}^*) = \bar{Q}^* \tag{1.25}$$

Esta condición se demuestra por contradicción. Cuando esta condición se satisface, el flujo combinado a todos los destinos en $N(\bar{Q})$ es igual a \bar{Q}^* y a cada destino se le asigna el envío con el procedimiento fijado por el valor de su flujo crítico (se debe comprobar para más de un valor de \bar{Q}). El valor óptimo de \bar{Q} es determinado mediante la comparación del coste asociado con cada \bar{Q} que satisface la ecuación (1.25).

En Blumenfeld et al. (1985) se aplica el mismo método de EOQ al análisis del balance entre costes de transporte e inventario en el caso del envío directo entre un punto de envío a varios destinos con y sin sincronización de la producción y consumo con el transporte. En ambos casos se calcula un tiempo de ciclo L^* óptimo para que se realicen todos los envíos desde el punto origen a la multiplicidad de destinos.

Adicionalmente, también se especifican los costes de inventario y de transporte para los envíos desde varios puntos origen a varios puntos de destino, todos ellos a través de una terminal de consolidación. A partir de la terminología anterior y suponiendo el sufijo 1 para las variables que se refieran al transporte desde el origen hasta la terminal, el sufijo 2 para las variables que se refieran al transporte desde la terminal hasta el destino y T_c como el tiempo de manipulación en la terminal, el coste total por mercancía transportada en una relación origen-destino determinada se puede modelar mediante la formulación (1.26).

$$C = \left[PR \left(\frac{V_1}{Q_1} + T_1 \right) + \frac{F_1}{V_1} \right] + PRT_c + \left[PR \left(\frac{V_2}{Q_2} + T_2 \right) + \frac{F_2}{V_2} \right] \quad (1.26)$$

El primer y tercer término son los mismos que los costes de un arco simple que aparecían en la ecuación (1.5). De esta forma, como en el envío directo, los costes totales se pueden optimizar minimizando el coste en cada arco por separado. Se debe notar que la ecuación anterior no tiene en cuenta el coste de adquisición de la terminal ni sus costes operacionales. Estos costes se deberían incluir en la formulación y hacerlos proporcionales al flujo.

Finalmente el artículo se focaliza en la determinación de la estrategia más óptima de envío a través de la terminal o de un envío directo para el envío de muchos a muchos. Se parte de que la estructura de envíos óptima para toda la red dependerá de la opción escogida en cada par de origen y destino. Debido a que los arcos son independientes, el método de optimización debe determinar simultáneamente las estrategias óptimas de ruteo para todos los pares orígenes y destinos y el tamaño del envío. De este modo, el autor propone realizar una descomposición

de la red en una subred donde se considere únicamente las posibilidades de un solo origen o un solo destino.

Estrategias de paradas múltiples (*peddling*) complementarias al *hub&spoke*

En Daganzo (1988) se establece un análisis de las alternativas *peddling* para la distribución desde un solo origen a un grupo de delegaciones desde las que salen rutas de reparto local. El objetivo de las rutas *peddling* es la consolidación en el vehículo de distintos envíos a diferencia de la estrategia de *hub&spoke* en la que la consolidación se efectuaba en la propia terminal. Partiendo que la mercancía a repartir es homogénea y barata (costes unitarios de inventario bajos en relación a costes de operación) y que no se producen variaciones estacionales de las variables así como la inexistencia de restricciones sobre la longitud de la ruta, se determinan las condiciones óptimas para la estrategia *peddling*. Esta estrategia conllevará, bajo los supuestos anteriores, la configuración de rutas en la que no será necesaria la consolidación de la mercancía en ninguna terminal.

La metodología propuesta tiene en cuenta los costes de inventario en la instalación y costes de transporte proporcionales a la distancia y se representa gráficamente en la Figura 1.10. No se consideran los costes por parada, costes de manipulación de la mercancía o de inventario en tránsito. De esta forma, resulta indispensable evaluar los intervalos de envío y la distancia recorrida desde el origen de la distribución a las delegaciones así como los intervalos de servicio y distancias desde las delegaciones hasta los puntos de servicio.

Se puede comprobar que si existe coordinación entre la llegada a la delegación del envío procedente del origen y la salida de la mercancía desde cada delegación hacia los puntos de servicio, el tiempo en que la mercancía está almacenada (ya sea en el almacén origen o en la delegación) es el valor máximo entre T_1 o T_2 . En este sentido, el coste total unitario (por unidad de mercancía) que se considera está determinado por la ecuación (1.27).

$$c = \pi i \max\{T_1, T_2\} + \frac{\alpha}{V_1} D_1 + \frac{\alpha}{V_2} D_2 \quad (1.27)$$

V_1 : Tamaño del envío en la distribución entre el origen y las delegaciones	V_2 : Tamaño del envío en la distribución entre las delegaciones y los puntos de servicio
D_1 : Distancia de la/s ruta/s que unen el origen con las delegaciones	D_2 : Distancia local de la/s ruta/s que unen las delegaciones con los puntos de servicio

α :	Coste de recorrer un kilómetro por vehículo	π :	Coste de la mercancía
i :	Tasa de interés de inventario	T_1, T_2 :	Tiempo de almacenaje en origen y en delegaciones respectivamente

El autor determina que las distancias de las rutas D_1 y D_2 dependen del tamaño de la región servida por las rutas que se inician desde el origen o las delegaciones. En este sentido, si bien existen fórmulas que determinan la variación de la distancia en función de otras variables, basta considerar únicamente las propiedades que se mencionan a continuación para analizar los beneficios de las rutas *peddling* o de consolidación en terminal:

- La distancia total en una región de servicio manteniendo fijas todo el resto de variables (tamaño de la región de servicio, almacén, localización de los clientes, etc.) crece con el número de rutas de vehículos utilizados.
- La longitud media de la ruta de un vehículo manteniendo fijas todo el resto de variables decrece con el número de rutas de vehículos.
- La longitud media de la ruta de un vehículo manteniendo fijas todo el resto de variables decrece si crece el número de orígenes (espaciados regularmente) desde los cuales los vehículos pueden ser enviados.

Se recomienda de forma general que en un sistema con delegaciones, las rutas locales de reparto deben operar con la misma frecuencia que las rutas principales que las alimentan, de forma que $T_1=T_2$.

Si se supone que $T_2 < T_1$, se puede demostrar que puede ser posible la reducción del coste de la ecuación (1.27) incrementando el intervalo de las rutas locales hasta igualar a T_1 sin el cambio de ninguna ruta del sistema. Aunque el número de unidades de mercancía se incrementara, nunca llegará a ser superior a V_1 debido a que la conservación de flujo exige que la suma de la mercancía entregada en las rutas asociadas a una delegación debe ser igual a la fracción de V_1 que se deja en la delegación por las rutas principales. De esta manera, V_2 como máximo igualará a V_1 en el caso que el número de rutas locales que abandonan la delegación n_2 y el número de paradas de la ruta principal m_1 sean igual a 1. Debido que los vehículos de mayor capacidad pueden también ser usados en las rutas locales (si no existen problemas de gálibo o restricciones físicas), podrá ser transportado un mayor volumen de mercancía. De esta forma, se puede incrementar T_2 y consecuentemente V_2 hasta T_1 , de forma que se reduce el tercer término de la ecuación (1.27) manteniendo los demás constantes.

En el caso que $T_2 > T_1$, es posible incrementar T_1 a la vez que mantener V_1 constante. Debido que las unidades de mercancía son producidas a un ritmo constante para cada destino, se debe reducir el área cubierta por la ruta del vehículo para garantizar que el número de unidades de

mercancía producidas para la ruta durante T_1 sea igual a V_1 . Si se realiza esta estrategia manteniendo las delegaciones y la programación de las rutas locales, se deberá reducir el número de paradas de la ruta principal m_1 . En este sentido, D_1 se reducirá (propiedad b) por lo que se debe incrementar T_1 al máximo ya que el resto de variables de la ecuación (1.27) se mantiene constante.

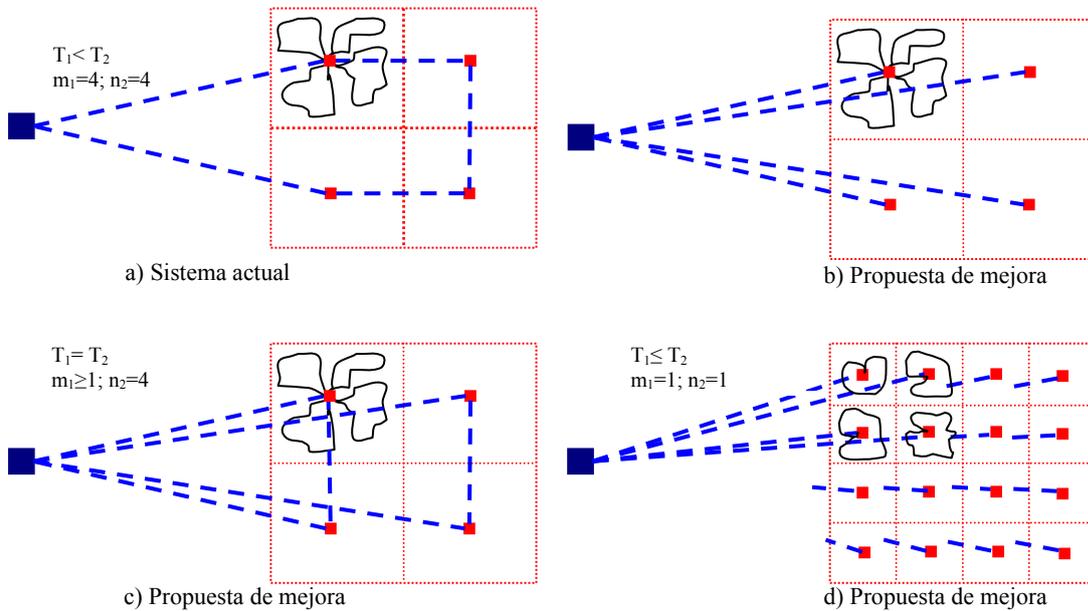


Fig. 1.10. Configuraciones mejoradas para un sistema one-to-many. Fuente: Elaboración propia a partir de Daganzo (1988)

Las Figuras 1.10 b) y c) reproducen dos casos particulares de mejoras del sistema de distribución que pueden darse cambiando el intervalo de reparto, las paradas en delegaciones y las rutas de reparto local. La segunda mejora (Figura 1.10c) detalla el caso en que se puede establecer $T_1 = T_2$ mientras que en la primera (Figura 1.10.b), T_1 no se puede incrementar sin cambiar ninguna variable de la distribución local. Si m_1 , V_1 , V_2 y T_2 se mantienen constantes, T_1 puede ser incrementado reduciendo el tamaño de las regiones de servicio asociadas a cada delegación. Haciendo esta operación sin cambiar V_2 y T_2 , las rutas locales cubren todavía la misma área y consecuentemente n_2 decrece. Este proceso puede repetirse hasta que $T_1 = T_2$ o $n_2 = 1$ (detallado en la Figura 1.10.d). El coste decrece porque el tercer término D_2 de la ecuación decrece mientras los otros términos se mantienen constantes (acorde con la propiedad c). En el caso representado por la Figura 1.10 d) cuando $T_2 > T_1$, la propiedad de conservación del flujo en la delegación garantiza que $V_2 > V_1$, por lo que es posible incrementar V_1 y T_1 hasta V_2 y T_2 . Esto llevaría a reducir el segundo término de la ecuación (1.27).

Una vez analizado que $T_1 = T_2$, se puede comprobar que el número óptimo de rutas locales asociadas a una delegación n_2 debe ser igual a 1. Si n_2 es superior a 1, se podría permitir que

un vehículo de reparto transportara las n_2 cargas asociadas a los puntos de la región en una sola ruta de reparto. En este sentido se puede forzar a que n_2 sea igual a 1 porque la carga resultante de la ruta local es una fracción de V_1 . Por lo tanto, por la virtud de la propiedad 1, el número total de vehículos-km (viajados en cada intervalo de tiempo) decrecería pero el número total de unidades de mercancía transportada se mantendría constante. Este hecho hace que la distancia recorrida por unidad de mercancía y consecuentemente el tercer término de la ecuación (1.27) también se reduzca si $n_2 > 1$.

La caracterización del sistema de distribución y las estrategias de envío desarrolladas en este capítulo han servido como punto de partida para la definición de modelos de diseño de rutas y localización de terminales abordados en el capítulo 2 de esta tesis. En este sentido, en el próximo capítulo se propondrán distintas formulaciones del coste global del sistema y criterios de optimización en función del tipo de estrategia de envío y las restricciones aplicables al problema.

