



---

**Universidad de Valladolid**  
**Facultad de Ciencias**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

Grado en Estadística

**Cross Docking: descripción y análisis**

Autor:

D<sup>a</sup>. Raquel María Andrés Quintana

Tutor/es:

D. Jesús Sáez Aguado

**19 de Julio de 2017**

**A mis padres, hermanos y Rafa por aguantarme tanto.  
Al tutor por toda la paciencia demostrada a lo largo de este tiempo.  
Al resto de profesores del Grado.  
Y, sobre todo, a los compañeros que he tenido en estos años.**

**Gracias.**

## Resumen

En el presente trabajo se muestran los conceptos generales de la estrategia de Cross Docking, detallando los requerimientos mínimos necesarios para la puesta en marcha de la implementación de dicha estrategia. En primer lugar, se elabora el marco teórico básico para el diseño de almacenes de Cross Docking y se incorporan algunos elementos importantes referentes a su diseño y ubicación. También, se elabora una lista con algunas de las contribuciones asociadas a la estrategia de Cross Docking, y se describen algunos modelos de Programación Matemática, principalmente de Programación Entera, y algunos de los principales métodos heurísticos y metaheurísticos para su solución. Por último, se hace referencia al panorama actual del sector logístico y su regulación, y se resume la actividad que llevan a cabo algunas de las empresas españolas en cuanto a la implantación de dicha estrategia.

**Palabras clave:** Cross docking, Terminal de consolidación, Programación Entera, Métodos heurísticos y metaheurísticos.

## Abstract

In this paper the general concepts of the Cross Docking strategy are presented, detailing the minimum requirements necessary for the implementation of the strategy. Firstly, the basic theoretical framework for the design of Cross Docking warehouses is elaborated and some important elements regarding its design and location are incorporated. Also, a list with some of the contributions associated to the Cross Docking strategy is elaborated, and some models of Mathematical Programming are described, mainly of Whole Programming, and some of the main heuristic and metaheuristic methods for their solution. Finally, reference is made to the current panorama of the logistics sector and its regulation, and it summarizes the activity carried out by some Spanish companies in the implementation of this strategy.

**Keywords:** Cross docking, Consolidation terminal, Integer programming, Heuristic and metaheuristic methods.

**INDICE**

	PÁGINA
Introducción	6
Objetivos	6
1. Marco teórico	7
1.1 Cross Docking	7
1.1.1 Definición de Cross Docking	9
1.1.2 Aplicaciones	12
1.1.2.1 Sistema hub and spoke	12
1.1.2.2 Consolidación y des-consolidación	14
1.1.3 Tipos de Cross Docking	15
1.1.3.1 Cross Docking Directo	16
1.1.3.2 Cross Docking Indirecto	17
1.1.4 ¿Por qué implementar Cross Docking?	17
1.1.5 Diseño de la infraestructura para la estrategia de Cross Docking	17
1.2 Centro de Distribución	21
1.2.1 Definición de Centro de Distribución	21
1.2.2 Almacén Versus Centro de Distribución	21
1.2.3 Operaciones típicas en un Centro de Distribución	22
1.2.4 Centro de Distribución y Cross Docking	23
1.3 Redes de Distribución	24
1.3.1 Costes de las Redes de Distribución	26
1.3.2 Estructura de una red de paquetería industrial	28
1.3.3 Tipos de estrategias de envío	32
2. Cross Docking - Revisión de la literatura existente	33
2.1 Aproximaciones continuas	35
2.2 Modelos basados en programación matemática y algoritmos heurísticos asociados	38
2.3 Introducción a las heurísticas	42
2.3.1 Heurísticas greedy de construcción	42
2.3.2 Método random greedy	43
2.3.3 Métodos greedy aleatorizados	43
2.3.4 Métodos GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedures)	45
2.4 Algunas de las contribuciones desarrolladas para la localización de terminales de consolidación	45
2.4.1 Programación matemática y heurísticos para la localización de terminales hub	45
2.4.2 Heurísticos para el problema de localización de h hubs	48
2.4.3 Programación matemática para la localización de terminales de consolidación o hubs y asignación de envíos a rutas	51
2.4.4 Extensión de los modelos de programación matemática	55
2.4.5 Algoritmos metaheurísticos para el problema de localización y asignación a rutas	57
2.4.5.1 Recocido simulado (Simulated Annealing, SA)	57
2.4.5.2 Algoritmos genéticos (GA)	61
2.4.5.3 Búsqueda Tabú	62
2.4.5.4 Colonia de Hormigas (ACO)	64

2.4.6 Metodologías integradas de planificación de envíos en red troncal y red capilar	65
3. Cross Docking - Estrategia logística en España. Algunos ejemplos	68
3.1 Plan de Estrategia Logística	68
3.2 Análisis del contexto europeo	74
3.3 Algunos ejemplos de empresas que aplican Cross Docking	77
3.3.1 Grupo Eroski	77
3.3.2 Fnac	81
3.3.3 FCC Logística	83
3.3.4 Puerto de Santander	84
4. Conclusiones	85
5. Futuras aplicaciones	86
Bibliografía	87

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la Logística es un tema muy relevante, anteriormente poco se escuchaba hablar de él, pero día a día ha ido tomando fuerza y las empresas poco a poco se han dado cuenta que es un tema muy importante, a partir del cual se han derivado una serie de ventajas y estrategias competitivas que las empresas pueden desarrollar e implementar para sobresalir y ser mejor que sus competidores.

Una de esas estrategias es el manejo de la distribución de mercancías a través de Cross Docking. Es de suma importancia y ventaja para las empresas, ya que se ahorran los costes de tener almacenadas las mercancías, debido a que éstas son colocadas en el punto de venta, que es donde la mercancía genera valor.

Para que las empresas puedan aplicar esta estrategia, es necesario tener conocimientos de toda la cadena logística, desde pronósticos de la demanda, relación con proveedores, cadena de suministros, administración de inventarios, canales de distribución y la distribución misma de la mercancía.

El presente trabajo muestra los conceptos generales de la estrategia de Cross Docking, detallando los requerimientos mínimos necesarios para la puesta en marcha de la implementación de dicha estrategia.

## OBJETIVOS

### *OBJETIVO GENERAL*

Estudiar algunas de las contribuciones desarrolladas en la optimización de problemas de Cross Docking.

### *OBJETIVOS ESPECIFICOS*

- ✓ Mostrar el estado actual de las operaciones de Cross Docking y visualizar sus oportunidades reales.
- ✓ Plantear requerimientos específicos a cumplirse para que una empresa que no sea un operador logístico pueda aprovechar esta herramienta.
- ✓ Elaborar el marco teórico básico para el diseño de almacenes de Cross Docking e incorporar algunos elementos importantes de su diseño y ubicación.
- ✓ Elaborar una lista de algunas de las contribuciones asociadas a la estrategia de Cross Docking.

## 1. Marco Teórico

### 1.1 Cross Docking

En los últimos años el sector industrial ha sufrido grandes transformaciones que han obligado a las empresas a renovarse para seguir siendo competitivas. La gestión logística es un elemento clave para conseguir la eficiencia buscada. Dentro de la gestión de proyectos logísticos si algo ha revolucionado los modelos de distribución es el Cross Docking.

El éxito en la gestión de un proyecto logístico, obteniendo un resultado de calidad, pasa por tomar conciencia de las necesidades del cliente y tener en todo momento el control de las actividades que se están realizando.

Ser un buen gestor significa saber optimizar al máximo los recursos para conseguir el objetivo fijado. Reducir los costes, cumplir con los plazos fijados y obtener unos buenos resultados. Pero para conseguirlo se tiene que tener un alto grado de control sobre todos los aspectos de los que se compone el proyecto.

La logística es una parte fundamental en la consecución de los objetivos empresariales ya que permitirá **aumentar la rentabilidad del proyecto**. Además, tener controlada la logística hace posible un mejor proceso de toma de decisiones.

Una buena **gestión logística** permitirá mejorar las relaciones con las personas implicadas en el proyecto, sobre todo en lo que respecta a terceros como proveedores y clientes. Será más fácil establecer los límites económicos y temporales del proyecto, evitando errores de planificación.

Es necesario que el **proyecto logístico** esté muy bien planeado, no sólo centrándose en el binomio coste-beneficio sino sin obviar otros importantes aspectos como son:

- La estrategia de operaciones.
- Las políticas medioambientales.
- Las vías de acceso y servicios disponibles.
- Las políticas de aprovisionamiento.
- Las características del almacenamiento y del manejo de materiales.
- Las políticas de seguridad.
- La distribución de los equipos de trabajo.
- El volumen de operaciones.
- El soporte tecnológico del que se dispone.



Durante décadas se han puesto en marcha diferentes técnicas que permiten una mejor gestión logística entre las más eficientes se encuentran:

- Just In Time.
- Total Quality Management.
- Efficient Consumer Response.
- Distribución por terceros.
- **Cross-Docking.**

Una de las mayores ventajas que ofrece el Cross Docking es eliminar o reducir considerablemente el inventario del almacén. Al carecer de mercancía parada se ahorra mucho espacio y también se reducen los costes en lo referente a su manipulación y, lo que es más importante, no habrá "dinero estancado" puesto que la mercancía almacenada no genera ningún beneficio y, en cambio, sí muchos costes. Al reducir los stocks también se facilita la tarea de manipulación y reubicación de la mercancía, consiguiendo un número menor de errores. Este **sistema de distribución** disminuye también el tiempo y coste de trasladar los productos en el almacén, incluido el tiempo de introducción de la información en el sistema informático que se utilice.

Además, el **Cross Docking** por ser un modelo muy rápido consigue una mayor frescura de la mercancía y un aumento de su disponibilidad, al mismo tiempo se **facilita el cumplimiento de los plazos fijados**, lo que supone una gran ventaja de cara al cliente.

Por tanto el **Cross Docking** es muy útil para quienes están buscando:

- Un incremento en la velocidad del flujo del producto.
- La disminución de los costes de manipulación
- La reducción de los recursos destinados al inventario y un aumento de su rotación.
- Consolidación eficiente de la mercancía.
- Un uso más óptimo de los recursos (capital, recursos humanos y físicos entre otros).
- Un refuerzo para las estrategias JIT de los clientes, por tanto, una mayor satisfacción.
- Mejorar las relaciones comerciales entre socios de negocio, ya que los productos están disponibles antes para la venta al cliente final y se agilizan los procesos de pago y cobro.

Aunque la técnica del **Cross Docking** es altamente eficiente existen algunas circunstancias en las que no se debería utilizar porque no consigue un equilibrio entre el coste y el beneficio. Por eso algunos de los ejemplos en los que sería conveniente no emplearlo son:

- Situaciones no continuas.
- Si no se quiere invertir en infraestructura física, ya que el **Cross Docking** la requiere. Además, de un sistema informático que permita un manejo adecuado y completo de la información.
- Si las relaciones con los diferentes actores de la **cadena de suministro** no son buenas y constantes.

El **Cross Docking predistribuido** o **Cross Docking directo** es el que se suele utilizar para productos de alto movimiento y dimensiones reducidas con muchas referencias, como pueden ser los cosméticos, y para los productos frescos.

Para que se lleve a cabo el **Cross Docking predistribuido** la mercancía se recibe ya en las unidades logísticas que se hayan acordado entre proveedor y cliente, pueden ser cajas, pallets u otras. Se transportan al muelle de salida junto con las unidades logísticas de otros proveedores para consolidarlos en los vehículos de entrega para que vayan al destino indicado. En este tipo de **Cross Docking** la manipulación de la mercancía es mínima.

El **Cross Docking indirecto** es aquel en el que la mercancía cuando se recibe se fragmenta y re-etiqueta, se coloca en nuevas **unidades logísticas** que se transportan al muelle de salida para consolidar la carga en los vehículos de entrega.

Elegir entre un modelo de Cross Docking u otro va a depender de factores como:

- Tipo de mercancía con la que se trabaje y su volumen y dimensiones.
- Cantidad de referencias o sku's.
- Demanda del producto.
- Tiempo límite de entrega.
- Modelo de distribución que se utilice.

### 1.1.1 Definición de Cross Docking

Cross Docking es un sistema de distribución en el que la mercancía recibida de los proveedores en un almacén, bodega o centro de distribución, no es almacenada sino preparada inmediatamente para su próximo envío. Bajo este esquema no existe el almacenaje, ya que la mercadería pasa por un periodo muy limitado en el punto de

recepción, y de ahí es trasladada al punto de despacho para proceder a la carga de la misma.

La industria del transporte fue la pionera del Cross Docking en Estados Unidos en la década de los 30. Desde entonces ha venido evolucionando. El ejército de Estados Unidos comenzó a utilizar las operaciones de Cross Docking como estrategia de abastecimiento de su armamento y recursos en los años 50. Posteriormente Wal-Mart comenzó a utilizar esta estrategia para los productos de consumo masivo a finales de 1980.

El Cross Docking se caracteriza por manejar plazos muy cortos. Se necesita una gran sincronización entre toda la mercadería entrante y saliente.



En Logística el Cross Docking corresponde a un tipo de preparación de pedido (una de las funciones dentro de un centro de distribución, conocida también como "picking"), no hay almacenamiento de stockaje. Permite mover mercancías con diferentes destinos o consolidar mercancías provenientes de diferentes orígenes para un destino específico.

Como se ha mencionado, en sentido estricto el Cross Docking se hace sin ningún tipo de almacenaje intermedio. Evitar las operaciones de almacenaje permite reducir el plazo necesario para las operaciones logísticas. Es por este motivo que este sistema es utilizado especialmente, para los productos frescos (frutas, verduras, lácteos, carnes, etc.), periódicos, y grandes distribuidores entre otros.

Actualmente el Cross Docking en el país no se está utilizando por la gran mayoría de empresas, ya que es un concepto que se está comenzando a desarrollar. A nivel mundial de igual forma hay muchas empresas que ya están aprovechando las ventajas que brinda este sistema. Hay países donde está bastante desarrollado este tipo de gestión que incluso se están implantando últimamente máquinas clasificadoras, que por medio de cintas transportadoras, y un sistema de clasificación, son capaces de distribuir automáticamente la mercancía por bocas de salida marcando el ritmo al operario, con el fin de reducir costos. En China por ejemplo el sistema de

Cross Docking ha tenido mucho auge y se realiza en grandes escalas. En la siguiente imagen se muestra un centro de distribución de China en plena operación de Cross Docking. Como se puede observar en la imagen, el volumen que se maneja es bastante grande. Las instalaciones se ve que están hechas acorde a la necesidad para poder operar bajo un sistema de Cross Docking.



A pesar de que el Cross Docking elimina las dos operaciones de manipulación más caras, como son el almacenamiento y la preparación de pedidos, y se utiliza hoy en día por muchas empresas, probablemente no sea la mejor estrategia en todos los casos y en todas las circunstancias. Hay algunos factores que influyen si se compara el Cross Docking con los métodos de distribución tradicionales.

Un primer factor importante es la **tasa de demanda del producto**. Si hay un desequilibrio entre la carga que entra y la que sale, el Cross Docking no funciona bien. Por lo tanto, los productos que son más adecuados para el Cross Docking son los que tienen tasas de demanda más o menos estables, como por ejemplo, los comestibles y los productos perecederos, que se consumen regularmente. Para estos productos, los requisitos de almacenamiento y transporte son mucho más predecibles y, en consecuencia, la planificación y ejecución del Cross Docking se hace más fácil.

Los **costes unitarios de desabastecimiento** es un segundo factor importante. Debido a que el Cross Docking reduce al mínimo el nivel de inventario en el almacén, la probabilidad de situaciones de desabastecimiento es más alta. Sin embargo, si el coste unitario de desabastecimiento es bajo, los beneficios del Cross Docking pesan más que el aumento del coste de desabastecimiento. Por lo tanto, se prefiere Cross Docking para productos con una tasa de demanda estable y un bajo coste unitario de desabastecimiento. Mientras que el almacenamiento tradicional sigue siendo preferible en una situación opuesta, con una demanda inestable costes unitarios elevados de desabastecimiento.

Otros factores que puede influir a la hora de elegir el Cross Docking son la distancia entre proveedores y clientes (distancias más altas aumentan los beneficios de la

consolidación), el valor del producto y su ciclo de vida (mayor reducción de los costes de inventario para productos con valor más alto y ciclo de vida más corto), la cantidad de demanda (reducción mayor en el almacenaje y costes para los productos con una mayor demanda), la puntualidad de los envíos del proveedor (para asegurar una sincronización correcta entre los camiones entrantes y los salientes), etc.

Para planificar y controlar las operaciones de Cross Docking es muy importante contar con el software y hardware adecuados y adaptados a las necesidades específicas además de unas instalaciones físicas correctas.

Este sistema de software sólo puede funcionar correctamente si se alimenta con información precisa y oportuna. En comparación con la distribución normal, el flujo de información para apoyar el Cross Docking es significativamente más importante. Por ejemplo, para coordinar los camiones entrantes y salientes a los muelles adecuados, el tiempo de llegada y el destino de la carga deben ser conocidos antes de la llegada física de los bienes (por ejemplo, mediante aviso de envío por adelantado (ASN)). Varias herramientas de tecnología de la información están disponibles para realizar este flujo de información, por ejemplo el intercambio electrónico de datos (EDI), marcando los contenedores de transporte (SCM), códigos de barras y escaneo de productos utilizando código de producto universal (UPC). Independientemente de la tecnología que se elija, los socios de la cadena de suministro deben ser capaces y estar dispuestos a entregar la información requerida a través de esta tecnología. Una buena cooperación en toda la cadena de suministro puede hacer o romper la ejecución del Cross Docking.

### **1.1.2. Aplicaciones**

A continuación se mencionan algunas aplicaciones típicas del Cross Docking en la actualidad.

- Sistema "Hub and Spoke".
- Consolidación y desconsolidación
- Cross Docking de productos de consumo masivo

#### **1.1.2.1 Sistema Hub and Spoke**

Es un sistema de conexiones, en el cual hay un centro (Hub) donde se centralizan diferentes rutas de distintos orígenes para ser enviados a diferentes destinos (Spoke).

Este modelo se utiliza comúnmente en la industria, en particular en el transporte aéreo, transporte de mercadería, paquetería, telecomunicaciones, etc.

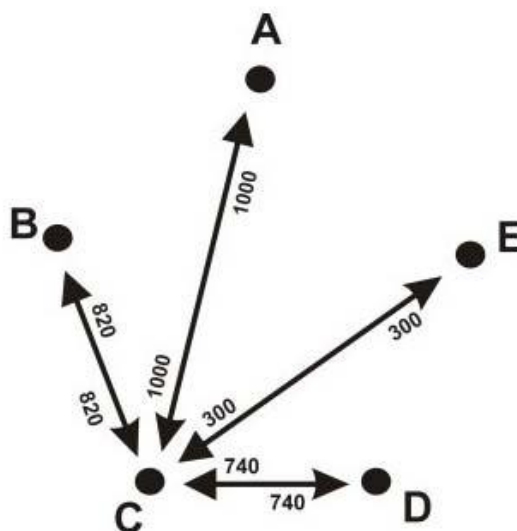
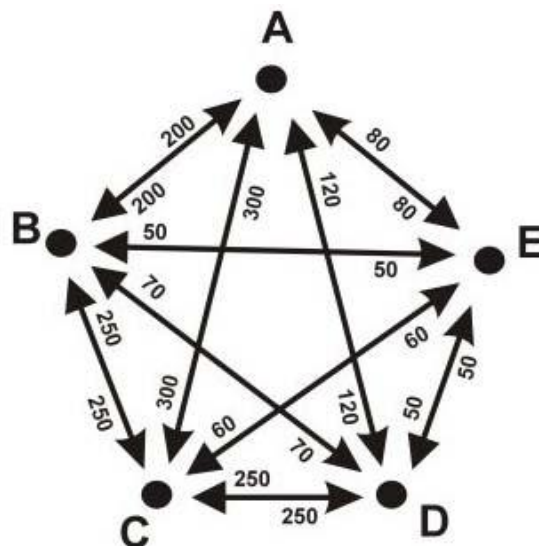
El sistema de Hub and Spoke tiene sus orígenes en el año de 1978, ocasionado por la desregularización norteamericana de la aviación.



El fondo de esa desregularización consistía en que cualquier empresa certificada podía volar cualquier ruta con una burocracia mínima. Es decir cualquier compañía aérea podía circular desde y hasta todas las ciudades del país. El problema que generó esto, es que ninguna compañía aérea tenía los recursos necesarios para poder volar todas las ciudades del país contra todas las ciudades del país. Hubieran sido miles de pares de ciudades servidas y no hubiera ni pasajeros ni capacidad económica para encarar una situación como ésta.

Para darle solución a esta problemática es que se propuso el sistema de Hub and Spoke, que consistía en definir un aeropuerto importante (Hub) al que convergerían rutas radiales (Spokes).

Al aplicar el sistema Hub and Spoke se puede pasar del esquema de la primera figura al de la segunda.



En el primero se representa la necesidad que se tiene de las conexiones entre los diferentes puntos A, B, C, D y E. Al hacer el análisis y la aplicación del sistema Hub and Spoke, se determina que la mayor demanda donde convergen los diferentes destinos es en el punto C y desde este punto se pueden abastecer los siguientes destinos ya sea solo haciendo la conexión o trasbordos para lograr las eficiencias deseadas. Es decir se pueden atender todos los puntos con menos movimientos.

A lo largo del tiempo este sistema fue evolucionando y ha sido aplicado indistintamente para el transporte de pasajeros o de carga.

Federal Express (FedEx) tiene una red mundial basada en su Hub carguero de Memphis en donde llegan todas las noches millones de paquetes que son distribuidos automáticamente a otros vuelos que los llevan a su destino final.

De igual forma que con el negocio de carga aérea, el sistema Hub and Spoke es utilizado en la industria marítima, en donde los buques llegan a una terminal de contenedores (Hub) en donde su carga es depositada y consolidada en otros buques para su posterior despacho a sus destinos (Spokes).

El mismo sistema se maneja para el transporte en ferrocarril, los vagones se consolidan y se transfieren en un patio de clasificación (Hub) y después son despachados a sus destinos.

Dentro del sistema Hub and Spoke se puede generar más eficiencias incluyendo "Short cuts" entre un punto y otro y fabricando las rutas de distribución para lograr entregar en la mayor parte de destinos que estén incluidos dentro del recorrido.

Entre las ventajas que brinda este sistema se pueden mencionar:

- Menor cantidad de enlaces para conectar todos los puntos.
- Mayor utilización de la capacidad del equipo de transporte.
- Mayor frecuencia de viajes entre puntos.

Pero de igual forma tiene sus desventajas, como pueden ser:

- Incremento de los tiempos de respuesta promedio.
- Aumento de las distancias promedio entre cada par de puntos.

### **1.1.2.2 Consolidación y des-consolidación**

La consolidación es un modelo que consiste en reunir en una unidad de transporte cargas de diferentes proveedores o clientes que van hacia un destino común o que siguen una misma ruta.

La ventaja de este modelo es que disminuye los costos logísticos, aumenta las frecuencias de despacho hacia un destino ya que se pueden reducir los lotes de

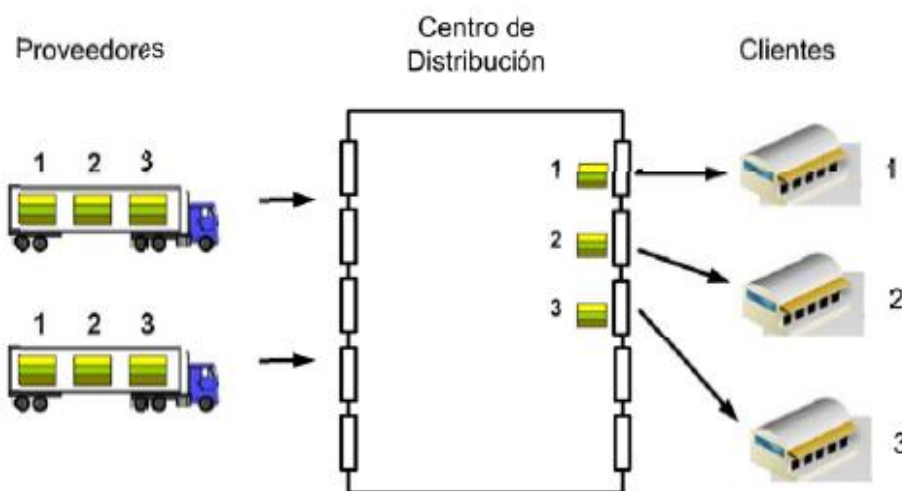
despacho. Pero de igual forma presenta sus desventajas, ya que se está amarrado al tiempo que tarde el consolidarse el equivalente a una carga completa de una unidad de transporte.

La des-consolidación de carga consiste en centralizar en un depósito o almacén la mercadería de un vehículo que ha sido consolidado en algún origen. El objetivo principal es poder desprender cada una de las cargas según la necesidad que se tenga de la mercadería.

### 1.1.3 Tipos de Cross Docking

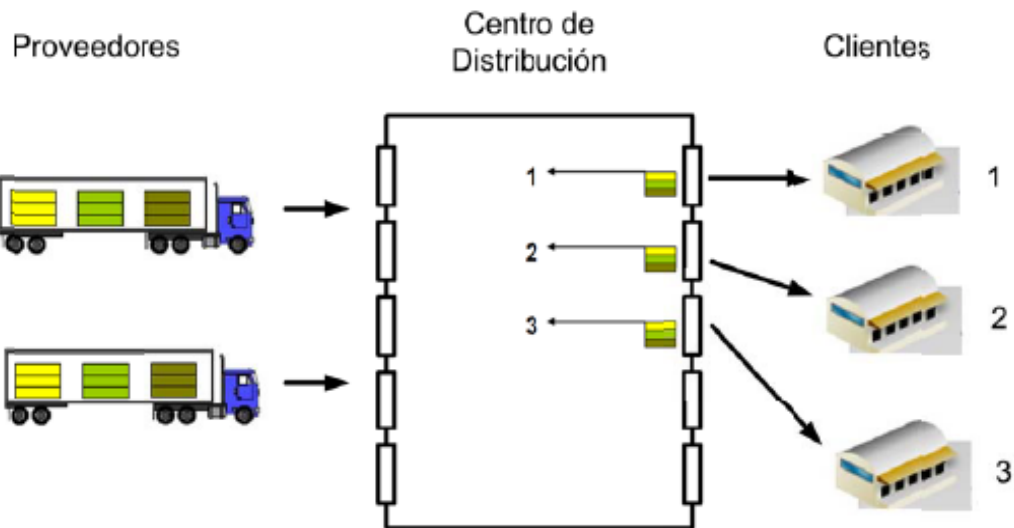
El Cross Docking puede ser de dos tipos, Directo o Indirecto. Esto va a depender de los acuerdos que se lleguen a negociar con los proveedores, ya que estos tipos de Cross Docking dependen del lugar o el responsable de realizar la preparación o clasificación de la mercadería.

- **Cross-Docking directo:** Las unidades logísticas (como pallets, cajas, etc.) pre-seleccionadas por el proveedor de acuerdo a las órdenes de los clientes, son recibidas y transportadas al dock de salida para consolidarlos como las unidades logísticas similares de otros proveedores en los vehículos de entrega a los clientes o destinos, sin que haya mayor manipulación.



- **Cross-Docking Indirecto:** Las unidades logísticas (como pallets, cajas, etc.) son recibidos, fragmentados y re-etiquetados, por el centro de distribución dentro de las nuevas unidades logísticas para ser entregadas a los locales, por ejemplo, roll containers. Estas nuevas unidades logísticas se transportan al dock de salida para consolidación de toda la carga de otros proveedores en los vehículos de entrega a los locales o destinos.





La elección de cualquiera de estos métodos depende de los puntos que se mencionan a continuación:

- El tipo de producto (percedero, no percedero, fresco, etc.)
- Modelo de distribución utilizado
- Cantidad de referencias o sku's
- Demanda del producto
- Volumen y dimensiones del producto
- Tiempo límite de entregas
- Costo de manejo

### 1.1.3.1 Cross Docking Directo

Los pedidos son preparados por el proveedor en función a cada uno de los puntos de destino o clientes. El proveedor lleva estos pedidos preparados en alguna unidad logística definida (roll container, java, pallet, etc.) hacia el Centro de Distribución. Posteriormente el Centro de Distribución recibe la mercancía en un sector de recepción y la traslada y consolida en el sector de despacho, donde es cargada y transportada a cada destino o cliente.

El detalle de la preparación de los productos por cada cliente lo realiza el proveedor. Esto le facilita y conviene al proveedor ya que el despacho es centralizado, es decir a un solo lugar.

Este método se utiliza usualmente para productos frescos, para incrementar la vida útil del producto. Sin embargo, también puede aplicarse a productos de baja rotación para la entrega a clientes de tamaño medio, tales como supermercados o pequeños autoservicios.

El otro tipo de producto que normalmente aplica a este método de Cross Docking son productos de alto movimiento y de dimensiones pequeñas, con una gran cantidad de referencias, como los cosméticos, productos para la higiene, productos de ferretería, dispositivos, etc.

### **1.1.3.2 Cross Docking Indirecto**

En este tipo de Cross Docking, el Centro de Distribución es el encargado de la preparación y clasificación de la mercadería para cada cliente o destino. El proveedor prepara los productos consolidados por sku y los despacha al Centro de Distribución. El Centro de Distribución al recibir el producto inicia la clasificación en el área de despacho para cada uno de los clientes o destinos que está solicitando dicha mercadería. Una vez consolidada toda la mercadería, se procede a realizar el despacho y envío hacia los clientes o destinos finales.

### **1.1.4 ¿Por qué implementar Cross Docking?**

El objetivo directo del Cross Docking es eliminar el inventario en el almacén, ya que mantener inventario es costoso, bajo el punto de vista del espacio físico que utiliza, dinero estancado y todo lo que relacione la manipulación. Los beneficios surgen de la eliminación del tiempo y los costos requeridos para transportar o trasladar el producto dentro y hacia las ubicaciones del almacén, incluyendo el ingreso de información en el sistema que se utilice.

Al implementar Cross Docking, se busca obtener uno o más de los siguientes resultados:

- Incremento en la velocidad del flujo del producto
- Reducción de los costos de manipulación en el Centro de Distribución
- Reducción del capital destinado a inventarios
- Mayor rotación de los inventarios
- Permitir la eficiente consolidación de mercancía
- Apoyar las estrategias "justo a tiempo" de los clientes
- Mejor utilización de los recursos (dinero, mano de obra, equipos, etc.)
- Reducción de los requerimientos o necesidades de espacio
- Reducción de la merma causada por exceso de manipulación
- Reducir el nivel de productos obsoletos y vencidos, debido a que no existe almacenamiento de los mismos
- Mejorar las relaciones comerciales entre socios de negocios pues se agilizan procesos de pago, por tener el producto más disponible para la venta al cliente final

### **1.1.5 Diseño de la infraestructura para la estrategia de Cross Docking**

Las instalaciones donde se llevan a cabo las operaciones de Cross Docking pueden tener diversas formas (I, L, T, U, H, X, W).

Qué forma elegir, depende de varios factores como el tipo de producto a manejar, el volumen y demanda de los mismos, la cantidad de puertas, el tipo de unidades de transporte, etc.

La forma más comúnmente usada es en forma de "I", es decir, de forma rectangular, con el objetivo de poseer un número considerable de puertas para la recepción y despacho de la mercancía.



Hay centros de Cross Docking que deben de tener un área considerable para el manejo o manipulación interna del producto, tanto para los que no requieren almacenamiento, como para los que sí requieren pasar un tiempo dentro de las instalaciones. La cantidad de puertas a considerar depende de la proporción de producto en base al manejo del mismo. Otro ejemplo del tipo de forma que pueden tener las instalaciones es la forma "T" o "L", que más que todo se aplica para instalaciones que manejan una proporción similar entre mercancía almacenada y no almacenada.



Otro de los puntos esenciales a considerar para el diseño de las instalaciones, es la naturaleza de los productos, la volumetría de los mismos y la facilidad para el manejo.

En la actualidad son muy pocos los centros de Cross Docking que están hechos a la medida según la necesidad, debido a la novedad de este tema en la industria de la logística y distribución.

En Norte América es donde se ha desarrollado más fuertemente todo lo relacionado con este tema y en la actualidad existen más de 10.000 centros de Cross Docking entre Estados Unidos y Canadá. La forma más común de éstos es en forma de "I" pero también hay otras formas, como por ejemplo:

- Forma de U en Portland (Consolidated Freightways)
- Forma de L en Chicago Ridge, IL (Yellow Transport)
- Forma de T en Atlanta, GA (American Freightways)
- Forma de H en Dallas, TX (Central Freight)

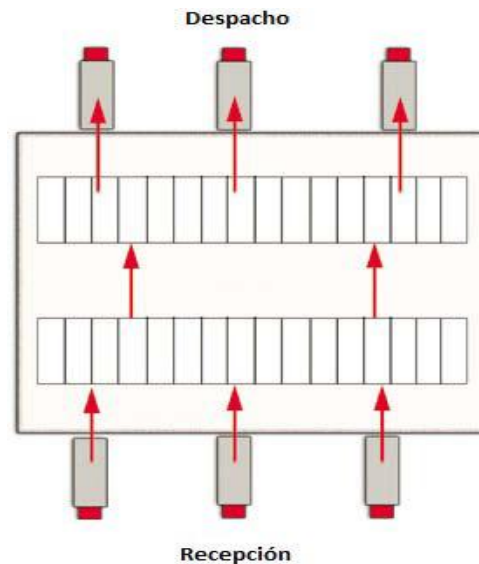


Para poder tomar la decisión de qué tamaño y qué tipo de infraestructura es la más idónea para un centro de Cross Docking se debe tener en cuenta los productos que se manejarán.

Algo fundamental para las instalaciones de Cross Docking es la cantidad de puertas que debe de tener para recibir y despachar la mercancía. Es mucho más fácil recibir que despachar. Existe una regla general que indica que en promedio lleva el doble de tiempo despachar mercancía que lo que se tarda en descargarla.

Por lo tanto, se necesitaría el doble de puertas para expedir la mercancía. De igual forma la teoría indica que la determinación de la cantidad de puertas está directamente relacionado con la cantidad de clientes que se tiene. Es decir, que si se tienen 40 clientes se debería de tener 40 puertas para despacho y 20 para recepción. En la práctica no es tan sencillo poder definir una estructura bajo esa lógica, por eso es necesario poder realizar una programación y planificación efectiva, desde el proveedor hasta el cliente final, para lograr eficiencias dentro de toda la cadena.

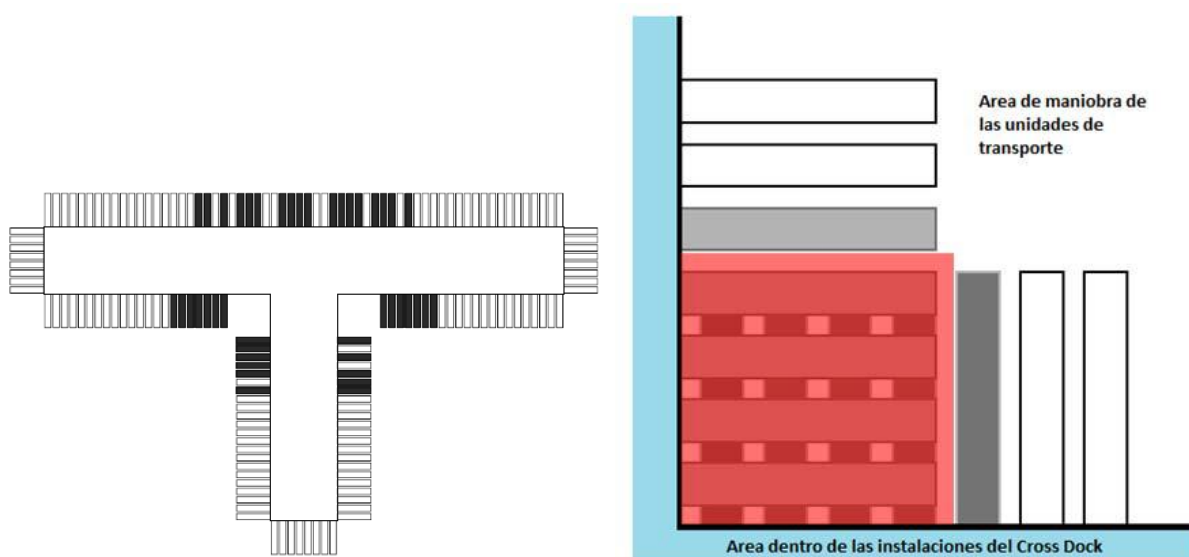
La forma que debe darse al centro de Cross Docking depende también de las ubicaciones donde se coloquen las puertas de recepción y despacho. Hay algunas empresas que colocan las puertas de recepción frente a las de despacho, para lograr un trayecto corto de desplazamiento dentro de las instalaciones. Bajo este criterio, la forma más común de instalaciones de Cross Docking es la de "I".



El problema con esta forma es que se pierde eficiencia si las instalaciones son demasiado grandes, ya que para trasladarse de una punta a otra, si ese fuese el caso, se perdería demasiado tiempo y el coste se incrementaría.

Para poder ganar eficiencia se opta por formas como "L", "T", "X" o "U" entre otras.

En la siguiente figura se tiene una distribución de Cross Docking en forma de "T", bajo este concepto se puede plantear las puertas de recepción en el centro de las instalaciones (las puertas que están negro), con el objetivo de que estén céntricas de las puertas de despacho (las que están sin color). Con esta solución se trata de reducir los movimientos, pero de igual forma presenta sus desventajas, ya que se pierde espacio en las esquinas de las instalaciones ya que en ellas no se pueden colocar puertas, debido a que no se cuenta con el espacio suficiente para que los vehículos de transporte maniobren. Ese espacio perdido es el que aparece sombreado en rojo en la siguiente figura.





## **1.2 Centro de Distribución**

En los últimos tiempos ha habido una evolución en lo que respecta a almacenes. Las empresas han identificado que el almacén dentro de la cadena logística es una parte o componente muy fundamental para el éxito de cualquier compañía.

Actualmente se maneja más el concepto de Centro de Distribución que el de almacén, ya que en un Centro de Distribución se ha identificado la oportunidad de añadir valor en términos de personalización del producto y de mejora del servicio al cliente.

### **1.2.1 Definición de Centro de Distribución**

Un Centro de Distribución es una infraestructura logística en la cual se almacenan productos y se preparan los pedidos según la demanda de los clientes para su distribución al comercio minorista o mayorista. Generalmente se constituye por uno o más almacenes, en los cuales ocasionalmente se cuenta con áreas para organizar la mercancía y compuertas, rampas u otras infraestructuras para cargar los vehículos.

Las compañías suelen definir la localización de sus Centros de Distribución en función del área o la región en la que éstos tendrán cobertura, incluyendo los recursos naturales, las características de la población, la disponibilidad de fuerza de trabajo, los impuestos, los servicios de transporte, los consumidores o las fuentes de energía, entre otras. Así mismo, deben tener en cuenta las rutas desde y hacia las plantas de producción, a carreteras principales, o a la ubicación de puertos marítimos, fluviales, aéreos, estaciones de carga y zonas francas.

### **1.2.2 Almacén versus Centro de Distribución**

El concepto de almacén ha ido variando a lo largo de los años, ampliando su ámbito de responsabilidad dentro de la función logística. En tiempos pasados, el concepto de almacén era sencillamente un lugar donde se almacenaba producto temporalmente.

Pueden existir varios tipos de almacenes en una empresa que se dedique a la fabricación, como son:

- Almacén de Materias Primas.
- Almacén de Productos en Curso.
- Almacén de Productos Terminados.

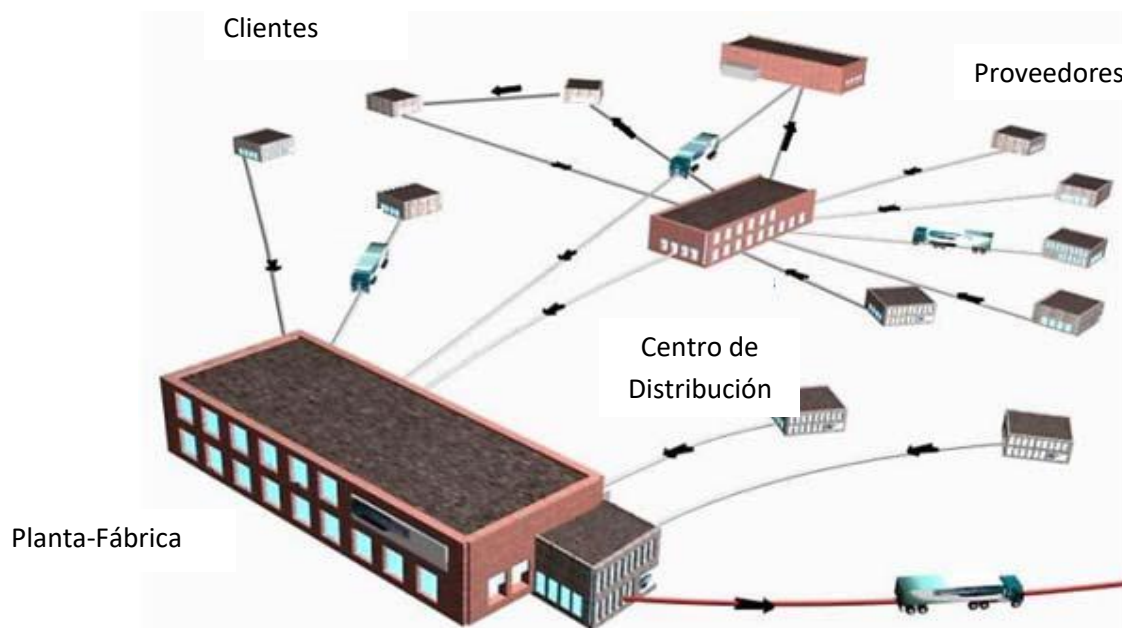
En cambio, un Centro de Distribución es un sistema que combina infraestructura, recursos humanos, equipos móviles y procesos; con el objetivo de recibir productos terminados de diferentes fábricas y proveedores, tomar pedidos, surtidos de manera eficiente y entregar la mercancía lo más rápido posible, basándose en los requerimientos del mismo.

Para mantener el ritmo impuesto por las demandas de los clientes, cada vez más exigentes, y para mantener los niveles de inventario en un mínimo, los almacenes se centran hoy en mover y no únicamente en guardar los productos como lo hacían antes. Aplican una gran variedad de herramientas y de técnicas para reducir la duración de cada ciclo de inventario.

Se puede decir que un Almacén es utilizado para almacenar producto de un solo fabricante, es operado por el Fabricante, posee una gran cantidad de una línea de productos determinada, manejan materia prima y producto terminado, y su infraestructura está enfocada en el almacenaje. En cambio, un Centro de Distribución es un punto de consolidación de productos de diversos fabricantes, está operado por un Distribuidor, posee una gran cantidad de productos diferentes, maneja producto terminado y su infraestructura está enfocada a la rotación de producto.

Otra diferencia es que en el almacén, la función principal es la de servir de regulador entre la oferta y la demanda (tanto por su estacionalidad como por el tamaño de pedido), y en el Centro de Distribución la función es la de incorporar valor al producto a través de operaciones finales como etiquetado, personalización del producto, división o agregación.

El concepto básico de un Centro de Distribución es centralizar operaciones, es decir, que todos los productos lleguen a un punto en común, como se observa en la siguiente figura.



### 1.2.3 Operaciones típicas en un Centro de Distribución

- Recepción.
- Almacenaje.
- Reposición.

- Cross-Docking.
- Preparación de Pedidos (Picking).
- Despacho.
- Distribución.

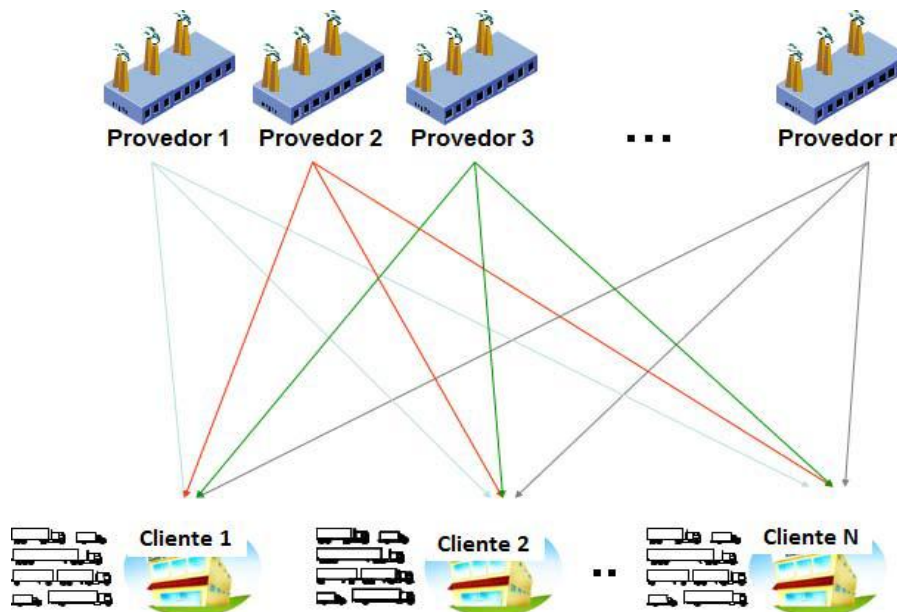
Como se ha mencionado anteriormente en un Centro de Distribución se necesitan ciertos recursos que son necesarios para el éxito del mismo. Entre estos recursos se pueden mencionar:

- Infraestructura adecuada. Con área de recepción y despacho adicional al área para la colocación de los estantes.
- Estantería acorde al tipo de mercancía a almacenar (simple, doble profundidad, drive in, drive through, shelving, etc).
- Equipos móviles (reach truck, order pickers, traspaletas de carga, etc).
- Sistema de gestión de almacén.
- Radio frecuencias.
- Etc.

#### 1.2.4 Centro de Distribución y Cross Docking

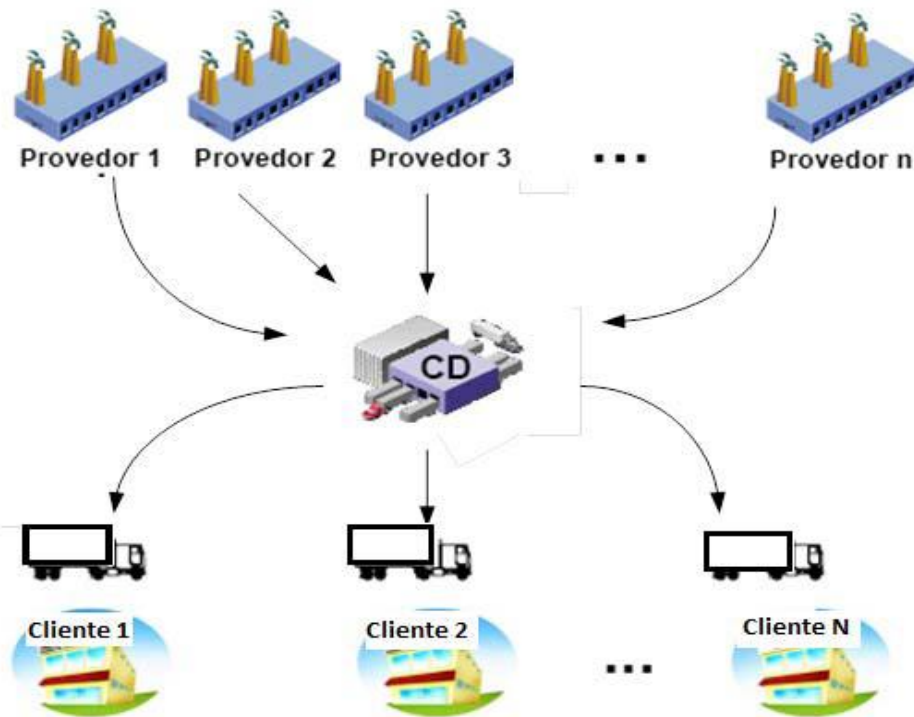
El objetivo de un Centro de Distribución es centralizar en un solo punto la mercancía para consolidarla y poder ser preparada para los diferentes puntos de despacho. Al mantener un esquema de centralización se generan una serie de eficiencias en la operación logística de una empresa. En las dos siguientes figuras se muestran un esquema no centralizado y uno centralizado.

##### Esquema no centralizado





### Esquema centralizado



Entre los beneficios de un esquema centralizado se pueden mencionar:

- Reducción de tráfico de camiones en los puntos de despacho del cliente.
- Mayor frecuencia de entrega a los clientes.
- Reducción del inventario donde el cliente.
- Reducción de tiempos de descarga.
- Mejora el cumplimiento de los pedidos.
- Alta capacidad ante quiebras de inventario.
- Reducción de mermas y averías.

Ya teniendo las ventajas de un Centro de Distribución al añadirle los beneficios que brinda un sistema de abastecimiento por Cross Docking, las empresas tendrían la oportunidad de ser sumamente eficientes y rentables. El tan solo hecho de erradicar el almacenaje brinda un margen mucho mayor a las empresas, ya que no mantendrían inventario estancado, que es traducido directamente en dinero sin movimiento.

### 1.3 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.

Las redes y servicios de transporte se pueden clasificar según las posibilidades de consolidación de los envíos en un mismo vehículo. Los servicios o envíos adaptados a un cliente 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*, (FLT). Un problema específico de estas redes son los retornos en vacío del punto de destino al origen, que constituye una actividad con coste elevado pero sin ninguna productividad para la empresa de transporte.

En segundo lugar, existen algunas empresas de transporte que presenta 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 acorde s 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 el tipo 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 distintos tipos 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 constituye 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 *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 productos.

### **1.3.1 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. Los costes logísticos pueden llegar a representar 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 ellos 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.

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 que integrará el coste de carburante, lubricante y el mantenimiento del vehículo. En segundo lugar, el vehículo tendrá asociado un coste fijo a escala diaria que representará el coste del personal de conducción, seguro y la amortización del vehículo (en caso de ser flota propia) o alquiler del vehículo (en caso de subcontratación).

Desde la perspectiva de las instalaciones fijas, se puede considerar un coste fijo de manipulación por unidad de tiempo y un coste unitario de manipulación por volumen de mercancía gestionada. Este coste de manipulación también podría integrar operaciones auxiliares como empaquetado y otros tratamientos de la mercancía por un correcto envío desde la delegación. Adicionalmente, también se debe incluir un coste unitario que represente el alquiler de la delegación por volumen de mercancía transportada y el coste fijo 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 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 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.

### 1.3.2 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 diferencia 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 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:

- La red troncal o entre delegaciones, 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. Las rutas asociadas a esta red suelen presentar un número significativo de paradas en clientes y se circunscriben únicamente en el territorio contiguo la delegación asociada.

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.

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

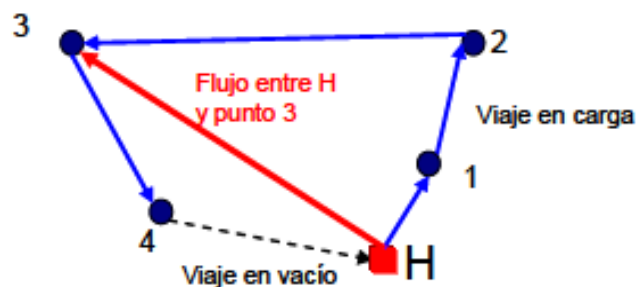
estrategia de distribución aprovecha las economías de escala derivadas de la consolidación de cargas. El objetivo de la consolidación en un *hub* es el equilibrio entre el incremento del factor de carga del vehículo hacia un mismo destino (reducción de costes unitarios de transporte) con el incremento de la distancia que conlleva en relación al envío directo. La implantación de los *hubs* surgió a principio de los años 80 en Estados Unidos, en el área del transporte aéreo de pasajeros y de mercancías como resultado de la desregularización del transporte aéreo.

La planificación de redes de distribución de las empresas de paquetería se puede articular en dos fases operacionales diferenciadas pero que resultan interdependientes en términos de coste y plazo:

- La fase estratégica de diseño de una red de distribución eficiente. Se deben identificar aquellas localizaciones donde ubicar terminales de consolidación, delegaciones (nodos), el establecimiento e identificación de las vías principales de comunicación entre éstas (arcos) con el fin de que los flujos de mercancías se distribuyan de forma óptima.
- La fase táctica y operativa de definición del encaminamiento de las cargas (flujos) través de los arcos dada una red existente y los plazos temporales de servicio. El objetivo es encontrar las mejores rutas que optimicen la función objetivo cumpliendo las restricciones del problema en una red de transporte ya definida.

Los modelos de planificación del transporte de mercancías se clasifican en modelos basados en flujos (*commodity problems*) y modelos basados en rutas de vehículos (*trip-vehicle problems*).

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 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 origen-destino 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 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 se han basado 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 entre origen y destino, independientemente de las rutas de vehículos.

Los primeros análisis de localización de almacenes y centros de producción con la determinación de flujos fijos de mercancía entre estos puntos se iniciaron en los años 80 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*.

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 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:
  - Sólo se pueden ubicar en un conjunto finito de nodos determinados (localización discreta)
  - Se pueden ubicar en cualquier nodo (localización continua)

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:

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

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

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

En este sentido, la verificación o enumeración de todas las posibilidades de ruta para la determinación de la mejor solución es inabordable. Sin embargo, el número de paradas máximo se suele limitar a 1 o 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 a 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 de la mercancía.

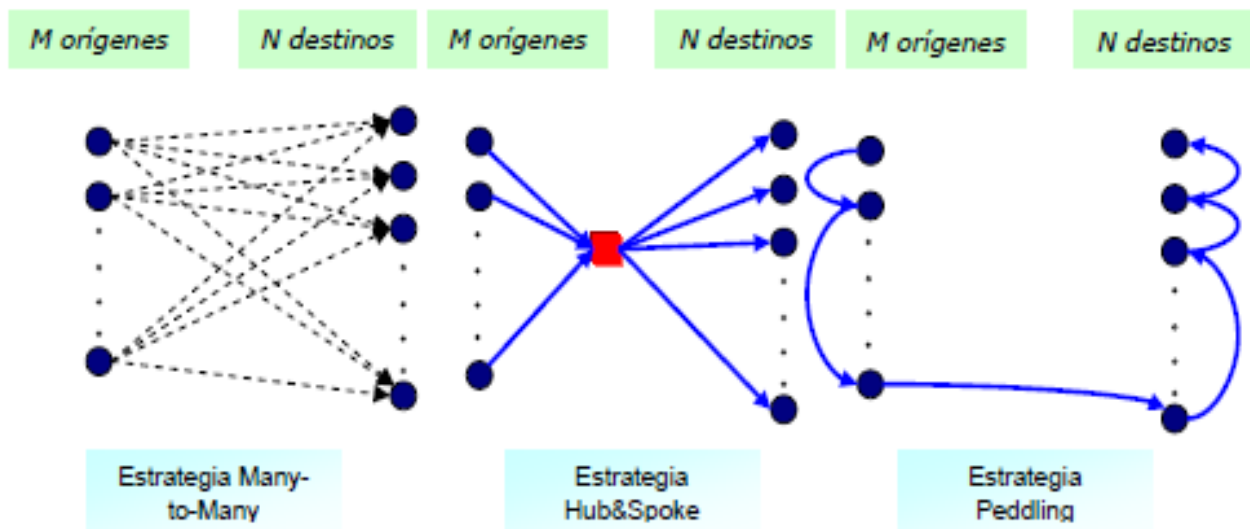
Una vez determinada la localización de los *hubs*, el problema de diseño de rutas de reparto se basa en la asignación de todas las delegaciones a uno de los *hubs* de la zona de servicio. Algunos investigadores han analizado las potencialidades de poder asignar un nodo a más de un *hub*. A partir de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



### 1.3.3 Tipos de estrategias de envío

La demanda de servicios en un territorio influye directamente en las estrategias a seguir para cubrir los puntos de demanda y en consecuencia, la tipología 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: 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.

Las estrategias básicas cuya combinación permiten planificar un sistema de distribución física se ilustran en la siguiente figura 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 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.
- **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.
- **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 servicio de vehículo relativamente altos.

## 2. Cross Docking - Revisión de la literatura existente

Para poner en práctica una estrategia de Cross Docking, hay que hacer frente a muchas decisiones durante el diseño y la fase operativa de las terminales de consolidación. Estas decisiones pueden tener un serio impacto en la eficiencia de la estrategia, por lo que tienen que ser cuidadosamente tomadas. En la literatura existente se estudian varios problemas de decisión. Algunos de estos problemas están más preocupados por las decisiones con efectos en un plazo más largo (estratégica o táctica), mientras que otros se ocupan de decisiones a corto plazo (operativa).

Las primeras decisiones que deben ser tomadas durante el proceso de planificación son las decisiones estratégicas: donde se localiza la terminal o terminales de consolidación, *hub* o *Cross Dock* y cuál es el mejor diseño de la misma. Una vez que la terminal está disponible, será parte de una red de alimentación (con una o más terminales). Una decisión táctica que se tiene que hacer después es cómo fluirán los bienes a través de la red para minimizar los costes, al tiempo que la oferta satisface la demanda. A continuación, el gerente se enfrenta a la toma de decisiones operativas (aunque también tienen aspectos tácticos) de rutas de vehículos: antes de llegar a la terminal de consolidación, la carga tiene que ser recogida en varios lugares, y los productos tienen que ser entregados en varias ubicaciones después de la consolidación en la terminal. Otras decisiones operativas se refieren a la asignación de camiones a las puertas de carga o la programación de los camiones, y a la ubicación donde se almacenarán temporalmente las mercancías. Por supuesto, el gerente también se enfrenta a problemas que no son específicos de esta estrategia, como son la programación de los recursos internos para la carga y descarga de las mercancías (por ejemplo, la mano de obra), la elección de la mejor estrategia para llevar a cabo la actividad, y la determinación de la secuencia óptima de empaquetado y carga de un camión.

Se deja para futuras líneas de investigación y análisis, el problema de asignación de muelle de carga, en el que los vehículos de transporte, contenedores o remolques, deben ser asignados a los diferentes muelles de carga dentro de una terminal de consolidación durante un período de tiempo determinado para realizar las actividades de carga y descarga. En este caso, la zona de aparcamiento se utiliza como zona de almacenamiento temporal. El transporte entre el aparcamiento y las puertas de entrada a la terminal se realiza mediante recursos adicionales llamados tractores de terminal.

Para cada contenedor o remolque, las actividades llevadas a cabo consisten en tres etapas: transporte del remolque desde el estacionamiento a una de las puertas de la terminal de consolidación, carga o descarga, y transporte del remolque desde la

puerta a la zona de estacionamiento. El mismo conjunto de máquinas idénticas (los tractores de terminal) realizan tanto la primera como la tercera etapa, y se supone que los tiempos de procesamiento (tiempos de transporte) son independientes el remolque y de la puerta asignada. Otro conjunto de máquinas idénticas ejecuta la segunda etapa, en la que ahora los tiempos de procesamiento (tiempos de carga o descarga) dependen del remolque y no de la puerta. Por lo tanto se va a tratar de un problema de asignación y secuenciación de tareas.

En este apartado se van a desarrollar las contribuciones más destacables relacionadas con la **localización de terminales de consolidación de carga o hubs** y las metodologías existentes para el **envío y asignación de mercancía a las rutas de una red de transporte de muchos orígenes a muchos destinos**.

La producción científica para la resolución de este tipo de problemas se puede dividir en tres familias de metodologías de resolución:

- **Aproximaciones continuas.** Esta metodología de resolución analiza los sistemas logísticos partir de las variables más relevantes, suponiendo que éstas no sufren variaciones importantes en la región de estudio. El método de las aproximaciones continuas se realiza reemplazando la información particular de cada elemento del sistema por funciones agregadas de la demanda y funciones sobre la distribución espacial de terminales sobre la región de servicio. Con ello se logra reducir el tamaño del problema a un número acotado de variables que permiten resolverlo analíticamente. En el modelo se intenta manejar funciones continuas fácilmente resolubles mediante cálculo elemental. El desarrollo de estas técnicas de análisis aplicadas a sistemas logísticos son atribuibles a los Profesores C. Daganzo y G. Newell.
- **Programación matemática.** Los métodos pertenecientes a este grupo tratan de desarrollar un modelo matemático para la optimización del sistema logístico. Las contribuciones en este campo empiezan en 1950 si bien su amplia difusión se alcanzó en el período 1980-2000. Mediante la definición de un conjunto de variables de decisión del problema, se trata de formular una función objetivo a minimizar (si se trata de costes) o a maximizar (si se habla de nivel de servicio) con una serie de restricciones sobre las variables. En función del objetivo, las características de las variables y su relación, se pueden encontrar un amplio espectro de problemas de programación matemática lineal o no lineal, problemas con variables reales o enteras, etc. El gran número de variables y ecuaciones empleadas produce que la solución exacta de algunos problemas de tamaño significativo (100 nodos o superior) no haya sido alcanzada por los altos requerimientos de memoria y tiempo de computación.
- **Algoritmos heurísticos y meta-heurísticos.** Debido a la alta complejidad del problema de distribución de muchos orígenes a muchos destinos y la inexistencia de herramientas que puedan calcular la solución exacta o el óptimo global del problema en un tiempo razonable, se ha desarrollado un conjunto de métodos denominados algoritmos heurísticos. Éstos llegan a un razonable

equilibrio entre el tiempo de resolución y la calidad del resultado obtenido. Sin embargo, estos procedimientos de cálculo aproximado han resultado ser poco efectivos o ineficientes en algunos problemas *NP-Hard* por lo que ha sido necesario su perfeccionamiento. De este modo se han desarrollado los algoritmos metaheurísticos, procesos iterativos que guían la búsqueda de la solución con una heurística subordinada. En el proceso de búsqueda, se aplican cambios, transiciones o perturbaciones a la solución actual y estrategias para su aceptación siguiendo unos criterios probabilísticos. El balance inteligente de estos procedimientos debe llevar a cubrir el espacio de soluciones y encontrar resultados o subdominios de soluciones cerca del óptimo global del sistema.

## 2.1 Aproximaciones continuas

La metodología de las aproximaciones continuas aplicada al problema de muchos orígenes a muchos destinos no sólo trata el problema de diseño topológico de la red, sino que también fija la operativa temporal óptima de gestión de los envíos. Se parte de una región de servicio de área determinada con una serie de terminales que tienen asociados unos envíos de carga entre ellas. Adicionalmente, un subconjunto de estas terminales actúan también como centros de rotura y consolidación de carga (terminales *hub*). En una primera etapa, si bien existen distintas terminales de consolidación, se analiza el problema de transporte de envíos de muchos orígenes a muchos destinos, permitiéndose que cada envío pase exclusivamente por una terminal de consolidación de carga.

El método de análisis propuesto se descompone en tres niveles de análisis diferenciados:

- **Nivel operacional.** El problema se centra en la configuración y organización de rutas de vehículos entre las terminales *hub* y el resto de delegaciones, determinando una cadena ordenada de nodos de visita asociadas a un vehículo particular. La localización de la terminal de consolidación *hub* así como la frecuencia de servicio entre el resto de delegaciones (entradas o recogidas) y las terminales *hub* están fijadas en otros niveles de análisis.
- **Nivel táctico.** Se parte de las localizaciones de las terminales como datos de entrada y se pretende coordinar las frecuencias de envío de todos los puntos servidos por el mismo *hub*.
- **Nivel estratégico.** El problema se basa en definir la localización óptima de las terminales de rotura de carga a partir de los flujos agregados entre orígenes y destinos de la región de servicio.

En este análisis se parte de una serie de supuestos como los siguientes:

1. Cada terminal *hub* tiene asignado un conjunto de pares origen-destino a servir con una frecuencia de envío común para todos ellos, y con una demanda agregada de mercancía de valor determinado en toda la zona de servicio, lo que determina un intervalo de envíos en la región igual al inverso de la frecuencia

de envío. Es decir, si la frecuencia de envío es de  $1/3$  (1 envío cada 3 horas), el intervalo de los envíos será de 3 horas. De este modo el número de paradas realizadas por los vehículos en las rutas debe ser ajustado por la localización relativa a cada terminal *hub* en relación con los ritmos de variación espacial de la demanda y de abastecimiento.

2. El intervalo de los envíos es común para todas las terminales, para simplificar la operativa y los horarios.
3. Los costes de inventario en ruta pueden suponerse insignificantes.
4. Los vehículos circulan llenos.
5. Cada origen genera una carga a transportar inferior a la capacidad del vehículo, es decir, el vehículo de recogida de una terminal únicamente realiza una parada en aquel origen.

De esta forma, suponiendo un análisis unidimensional, el número de paradas de recogida efectuadas por distintos vehículos en un tiempo igual al intervalo de los envíos en un origen es igual al número de terminales *hub* a las que se encamina su carga. Es decir, se asigna un vehículo para cada terminal que visita los puntos en los que se debe recoger mercancía. En el mismo sentido, el número de paradas de entrega en ese intervalo en un destino también equivale al número de *hubs* desde las que se sirve la mercancía a la terminal estándar.

En este caso se puede definir una distancia de acceso a la región de servicio en la recogida (o entrega) como la distancia media entre la terminal desde (o hacia) la que se encamina la mercancía a todos los puntos de recogida (o entrega) multiplicada por el número de ciclos que empiezan en la terminal de consolidación. Si cada vehículo realizara únicamente una parada de reparto o de entrega, la distancia de acceso a la subregión sería igual a la distancia total recorrida (si se realiza el estudio en una dimensión).

De este modo, para comprobar la eficacia de distintas estrategias de asignación de puntos de servicio a terminales de consolidación basta con analizar el número de paradas y la distancia media de acceso a la región.

Una posible estrategia que se puede establecer para optimizar la distribución y reducir costes es definir una zona de influencia de recogida alrededor de la ubicación de una terminal, de forma que toda la mercancía de los puntos contenidos en esta área sea encaminada a través de la terminal *hub* en cuestión independientemente de su destino. Si todas las terminales de la zona de servicio operan de la misma forma, la determinación de las zonas de influencia se realiza a través de una partición de la zona de servicio.

Sin embargo, esta estrategia presenta el inconveniente que en algunos pares de puntos origen-destino, la distancia media de acceso a la zona supera la distancia mínima que los une a través de una ruta directa sin pasar por la terminal.

Una forma alternativa de servicio que elimina este efecto es determinar distintas zonas de influencia asociadas a una terminal *hub*. Esta estrategia elimina el efecto de

recorrer dos veces ciertos tramos de la ruta (*backtracking*) para la mayoría de pares de orígenes y destinos, a excepción de los pares de puntos situados entre dos terminales de consolidación adyacentes. Estos ahorros en la distancia de acceso se consiguen a expensas de añadir una parada más en la recogida en cada origen.

Hasta el momento, se ha considerado que todas las terminales de consolidación *hub* tienen las mismas características de funcionamiento y de tamaño para poder servir cualquier punto del territorio, de modo que la asignación de los puntos a cada terminal *hub* se ha realizado por criterios de distancia. Sin embargo, se puede demostrar que incrementando en poca medida el número de paradas de recogida en delegaciones, se pueden reducir significativamente las paradas de entrega de mercancías.

Siguiendo con el análisis unidimensional, se puede establecer una jerarquía de terminales *hub*, en función de la cercanía al centro de la zona de servicio. De este modo, la estrategia que puede ahorrar el recorrer dos veces un mismo tramo es la siguiente: se sirve cada par de delegaciones origen-destino a través de la terminal *hub* de mayor nivel jerárquico localizada entre el origen y el punto de destino. Si no se encuentra ninguna terminal entre los puntos se usa aquella situada más cerca de los puntos que pueda ser visitada desde los dos puntos con la menor distancia combinada. Con esta estrategia, cada punto recibe la mercancía de tantas terminales *hub* como número de niveles se haya establecido de la misma forma que encamina la mercancía a través de ese mismo número de terminales *hub*.

La forma de operación en terminales jerarquizadas es un sistema logístico muy común en distintas empresas de transporte, de forma que se constituye un *hub* de primer nivel y posteriormente se desarrollan terminales *hub* de menor jerarquía.

El problema táctico y estratégico se resuelve utilizando la solución óptima del problema operacional ideal, suponiendo que la flota de vehículos es homogénea y con la misma capacidad de carga y que hay un número dado de terminales *hub*. Se establece la función de coste logístico como suma del coste de recogida y reparto asociado a la parada, el coste de circuito por mercancía transportada en el envío sin paradas en el que se asume que los vehículos circulan llenos, el coste de operación de la terminal, y el coste de inventario estacionario en los orígenes y destinos. Una vez establecida esta función de costes, pueden aparecer distintas decisiones estratégicas a solucionar. Por un lado, dado un intervalo de envío, se podría plantear el número óptimo de terminales *hub* con el que operar para una empresa de transporte que quiere empezar a servir un nicho de mercado.

Otra tipología de problemas podría aparecer cuando se pretende determinar el mejor intervalo de envío para un valor dado de *hubs*. En estos casos, los costes de circuito y de terminal son fijos y únicamente se deben balancear los costes locales de parada y de inventario, con lo que se obtiene un valor óptimo del intervalo de envío.

Si algunos de los puntos origen-destino de servicio tienen asociados unos volúmenes de carga muy superiores al resto de puntos, se pueden plantear estrategias de

discriminación que consideren envíos directos entre estos puntos mientras que el resto de puntos sean servidos a través de la terminal *hub*. Los dos sistemas (puntos servidos por envíos directos y puntos pertenecientes a los envíos *vía hub*) tienen costes independientes de las acciones tomadas para controlar los envíos del otro sistema y por tanto pueden ser optimizados de forma separada.

Pero los problemas de distribución reales presentan una serie de particularizaciones que se alejan del conjunto de hipótesis planteado en esta metodología. Estas particularidades son:

- **Distribución no uniforme de la demanda.** La ubicación de los clientes potenciales en el territorio no es homogénea ya que existen múltiples criterios de localización de las actividades o empresas solicitantes de servicios de paquetería como el potencial económico de una zona, la dotación de infraestructuras, etc.
- **Retornos en vacío.** Las configuraciones de la red de distribución eficiente desarrolladas contemplan de forma separada el reparto y la recogida de mercancías de una zona. Sin embargo, uno de los puntos de mayor capacidad de optimización del sistema es la reducción de los retornos hacia terminales en vacío, es decir, sin carga.

## 2.2 Modelos basados en programación matemática y algoritmos heurísticos asociados

Las aproximaciones continuas de las variables del problema de distribución física permiten identificar las variables de decisión sobre las que se debe actuar para optimizar la configuración logística actual.

Sin embargo, la mayoría de modelos de localización de almacenes o terminales de consolidación de la literatura científica se han basado en problemas con variables discretas en los que se conocía exactamente la demanda de cada cliente de la zona de servicio y su ubicación. En este sentido, a diferencia de las aproximaciones continuas, existen modelos en los que se plantea una función objetivo de costes logísticos a minimizar (principalmente en función de la distancia recorrida) en los que se debe tener como información de partida la localización exacta de los puntos de demanda de servicio (delegaciones, clientes, nodos), la red física que los comunica (arcos) y la identificación detallada de los flujos de carga o rutas logísticas de transporte. Si bien estos métodos proporcionan una solución más ajustada a la realidad, presentan como un punto débil la incapacidad de traslación de la solución a otros problemas parecidos así como la falta de identificación de las variables o subsistemas estratégicos del problema.

El desarrollo de las herramientas metodológicas de localización de centros de consolidación o terminales jerárquicas en problemas discretos se han formulado como un problema de programación matemática aunque ha sido incapaz de resolver configuraciones de tamaño relativamente pequeño debido a la complejidad del



problema. Dentro de la optimización combinatoria, esta tipología de problemas es *NP-Hard* por lo que en muchos casos ha sido necesario el desarrollo de algoritmos heurísticos de solución que aunque no proporcionen una solución óptima, tienen un tiempo computacional acotado.

En la siguiente tabla se resumen algunas de las contribuciones científicas desarrolladas en la localización de las terminales de consolidación o *hubs*.



Autor	Etapas del modelo	Hubs	Capacidad de hubs	Dominio de soluciones en localización	Estrategias de envío contempladas	Métodos de solución	Costes considerados	Observaciones
<b>Pearl (1985)</b>	Localización de hubs, determinación de su tamaño y rutas	Número indeterminado de tamaño indeterminado	Ilimitada	Discreto (dominio de soluciones mayor al número de hubs determinado)	One-to-many	Localización y tamaño de hubs con heurísticos	Costes unitarios de transporte fijos y coste de inversión en almacenes	
<b>Campbell (1986)</b>	Localización de hubs	Número determinado	Ilimitada	Continuo	Hub más cercano	Analítico	Costes de transporte constantes	Variación temporal de la demanda
<b>O'Kelly (1987)</b>	Localización de hubs y asignación de flujos a la red	Número determinado	Ilimitada	Discreto	Todos los envíos a través de hub (envío directo no permitido)	Localización: programación entera cuadrática que se resuelve con algoritmos heurísticos. Asignación: 1 nodo al hub más cercano	Costes iguales a la distancia recorrida	
<b>Aykin (1990)</b>	Asignación de flujos a la red	Número y localización determinado	Ilimitada	Discreto	Todos los envíos a través de hub (envío directo no permitido)	Asignación: 1 nodo al hub de menor coste (no menor distancia)	Costes unitarios de transporte fijos	
<b>Klincewicz (1991)</b>	Asignación de flujos a la red	Número y localización determinado	Ilimitada	Discreta		Heurísticos de asignación por distancia o multicriterio	Costes unitarios de transporte fijos	Parte del modelo de O'Kelly de 1987
<b>Aykin y Brown (1992)</b>	Localización de hubs y asignación de flujos a la red	Desconocidos	Ilimitada	Continua	Todos los envíos a través de hub (envío directo no permitido)	Asignación: 1 nodo al hub de menor coste (no menor distancia)	Costes unitarios de transporte fijos	Se considera un flujo simétrico
<b>Aykin (1994)</b>	Localización de hubs	Número determinado	Limitada	Discreto (dominio de soluciones mayor al número de hubs determinado)	Envío directo o a través de 1 o 2 hubs	Programación matemática entera y relajación Lagrangeana	Costes unitarios de transporte fijos	
<b>Aykin (1995)</b>	Localización de hubs y asignación de flujos a la red	Número determinado		Continua	Envío directo (fijados de antemano) o a través de 1 o 2 hubs	Programación matemática entera	Costes unitarios de transporte fijos	
<b>O'Kelly (1996)</b>	Localización de hubs y asignación de flujos a la red	Número determinado	Ilimitada	Discreto	Todos los envíos a través de 2 hubs	Asignación: 1 nodo a más de un hub	Costes unitarios de transporte fijos y costes de inversión en almacenes	Comparativa de escenarios con un número menor de hubs con asignación múltiple a escenarios con más hubs sin asignación múltiple
<b>O'Kelly (1998)</b>	Localización de hubs y asignación de flujos a la red	Número determinado	Ilimitada	Discreto	Todos los envíos a través de 2 hubs	Asignación: 1 nodo a más de un hub	Costes de transporte variables con el flujo (no lineales)	
<b>Ernst (1998)</b>	Localización de hubs y asignación de flujos a la red	Número determinado	Ilimitada	Discreto (dominio de soluciones mayor al número de hubs determinado)	Envíos a través de un hub	Programación matemática no lineal. Método del Branch & Bound y heurísticos (SA y descenso aleatorio)	Costes unitarios de transporte fijos	Comparativa de métodos para la distribución de servicios postales en Australia
<b>Abdinnour-Helun (1999)</b>	Localización de hubs y asignación de flujos a la red	Número indeterminado	Ilimitada	Discreta (entre nodos)	Envíos a través de un hub	Metodología del Branch & Bound y algoritmos genéticos	Costes unitarios de transporte fijos y costes de inversión en almacenes	
<b>Wasner (2004)</b>	Localización de hubs y rutas	Número indeterminado de tamaño determinado	Ilimitada	Continua	Envíos directos o a través de hubs	Localización y asignación mediante algoritmo heurístico	Costes unitarios de transporte entre hubs y de reparto fijos, costes de instalaciones no lineales con el flujo	Propuesta teórica más caso práctico de aplicación en Austria. Determina los límites de las zonas de reparto y entrega de cada ruta

Los conceptos básicos que permiten una comparación de las prestaciones diferenciales de cada modelo se basan en los siguientes puntos:

- **Etapas del modelo.** Los modelos desarrollados se basan en la resolución de distintas fases de los sistemas de distribución física: el proceso de localización de las terminales, la asignación a la red (entre terminales) de la mercancía asociada a cada par origen-destino y el proceso de determinación de rutas desde las terminales secundarias hasta los clientes. Los modelos presentados se centrarán en una de estas etapas o podrán dar solución a más de una a la vez.
- **Hubs.** El sistema logístico considerado puede partir de un número y localización de *hubs* prefijados a partir de los cuales se analiza el proceso de asignación de flujos a la red. Otra posibilidad es determinar de antemano el número de *hubs* que se utilizarán para realizar la distribución y calcular su localización óptima en el territorio.
- **Capacidad de hubs.** Un aspecto básico es la consideración de la capacidad de las terminales para dar servicio a toda la mercancía que se clasifica y se encamina a través de ella. La mayoría de los modelos no consideran la capacidad de las instalaciones, y únicamente unos pocos llegan a definir un sistema capacitado.
- **Dominio de soluciones en localización.** Los modelos que incluyen la etapa de localización de las terminales en su desarrollo pueden permitir que éstas se efectúen en cualquier punto de territorio (localización continua) u obligar a que la ubicación de las terminales se efectúe en un número de puntos singulares fijados de antemano (localización discreta en nodos especiales, delegaciones, puntos cercanos al mercado o a infraestructuras, etc.).
- **Estrategias de envío contempladas.** Los análisis científicos de los autores determinan distintas posibilidades de expedición de la carga que se diferencian en envíos exclusivamente a través de *hubs* o la simultaneidad de envíos directos y a través de *hubs* (en este caso se suele fijar el número máximo de 2 paradas en *hubs*).
- **Métodos de solución.** Uno de los puntos más importantes de diferenciación de los distintos modelos que se han analizado es las metodologías de resolución de los problemas. La mayor parte de los modelos ha desarrollado la programación matemática del problema logístico expresada como una función objetivo de costes a minimizar sujeta a unas restricciones y limitaciones. Sin embargo, la resolución del problema en programación matemática únicamente se ha podido desarrollar en un tiempo computacional asumible en problemas de tamaño limitado. Este hecho obliga a aplicar una relajación de las variables del problema para poder determinar soluciones a problemas de mayor tamaño o la adopción de técnicas heurísticas que si bien no aseguran que la solución sea óptima, realizan los cálculos en un tiempo acotado. Por último, las contribuciones científicas más recientes han desarrollado algoritmos metaheurísticos o heurísticos combinados con técnicas de *fine-tuning*, que a partir de una configuración existente sub-óptima realizan un proceso de refinamiento y optimización de la solución.

- **Costes considerados.** La inclusión de los distintos elementos de transporte varía en los modelos analizados. En este sentido, existen unos modelos que únicamente consideran los costes de transporte proporcionales a la distancia, otro grupo que incluye los costes de las instalaciones fijas (manipulación de la mercancía y amortización del coste de la instalación), y otro grupo que considera que los costes de transporte varían linealmente con el flujo de la mercancía transportada en cada arco.

## 2.3 Introducción a las heurísticas

Antes de analizar cada uno de los modelos anteriores, conviene introducir el concepto de heurística y los diferentes tipos.

### 2.3.1 Heurísticas greedy de construcción

Las heurísticas de construcción son procedimientos que construyen una solución factible para un problema. Normalmente, esta solución se usa como solución inicial en otro tipo de heurísticas más complejas. Una característica que se exige a este tipo de heurísticas es que sean sencillas y rápidas, pero proporcionando soluciones aceptables.

Los métodos greedy son los representantes más conocidos de las heurísticas de construcción. Su nombre viene del inglés, y en castellano, sería voraz o glotón, porque son métodos que toman lo que pueden sin analizar las consecuencias posteriores; también se les llama algoritmos miopes, porque no ven más allá de la iteración actual, y son 'cortos de vista', en el sentido de que no piensan en el futuro, no se detienen a pensar, toman un elemento de la solución y no vuelven atrás.

Los métodos greedy se pueden utilizar para resolver, de forma aproximada o heurística, cualquier problema de optimización, incorporando cada vez un elemento a la solución en función de la información disponible en ese momento; una vez elegido el elemento que va a pertenecer a la solución, el método no se replantea sacarlo, ni se hace ningún tipo de re-optimización. Son métodos rápidos y fáciles de implementar pero no garantizan alcanzar la solución óptima.

El funcionamiento es muy sencillo, y está basado en la definición de un criterio greedy, que normalmente está definido a partir de la función objetivo del problema. El algoritmo tratará de encontrar el elemento candidato que minimiza (o maximiza en su caso) el criterio greedy, de forma que, cumpliéndose las restricciones del problema, se pueda incorporar a la solución final. En cada etapa se tomará la decisión que se considera mejor en ese momento, sin considerar las consecuencias futuras, es decir, se escogerá entre todos los elementos candidatos el que minimiza (o maximiza en su caso) el criterio greedy. Para el siguiente paso es necesario redefinir el criterio y repetir la etapa hasta obtener una solución completa.

La selección del elemento a incluir en la solución depende de la función criterio elegida. Por lo tanto, la elección del criterio es clave para el rendimiento de un método greedy, y es muy dependiente de cada tipo de problema. En la práctica, la selección se efectúa encontrando un índice que minimiza (o maximiza) el criterio. En el caso de que haya varios índices optimizando el criterio, el método no discrimina ninguno en particular. Ésto implica que mediante el método greedy es necesario recorrer un bucle.

Para cada problema de optimización existe, generalmente, uno o varios métodos greedy que proporcionan soluciones de 'mediana' calidad. Así, se aplican estos métodos para algunos de los problemas más conocidos, como el problema del transporte, diversos problemas de asignación, problemas de cargas (mochila) y empaquetamiento (bin packing), los problemas de Set Covering, de cubrimiento máximos, de la  $p$  mediana, el problema del viajante o problemas de programación de tareas (scheduling). En general, se puede diseñar un método greedy para cualquier problema de optimización combinatorial.

Dado que el método greedy es una herramienta relativamente elemental, es utilizada generalmente para proponer buenas soluciones iniciales. Estas soluciones pueden ser mejoradas posteriormente con la introducción de aleatorización y los procedimientos de búsqueda local, llegándose a algoritmos más complejos y eficientes, como heurísticas de dos etapas (greedy más búsqueda local), o heurísticas multi-arranque basadas en aleatorización, como los métodos random greedy, método greedy aleatorizado y métodos GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedures).

### **2.3.2 Método random greedy**

En el caso de que haya varios índices optimizando el criterio greedy, el método no discrimina ninguno en particular. Con el método random greedy lo que se hace en cada iteración es calcular todos los índices que alcanzan el mínimo (o el máximo) de la función criterio, y seleccionar uno aleatoriamente. Este proceso se repite un número dado de iteraciones y se guarda la mejor solución obtenida.

### **2.3.3 Métodos greedy aleatorizados**

Estos procedimientos mezclan la construcción greedy con aleatorización de diferentes formas.

Todos los algoritmos de construcción buscan una solución incorporando cada vez un elemento. En cada paso se tiene una solución parcial. Un elemento que puede ser seleccionado para incorporarse a una solución parcial se denomina elemento candidato.

El método normal para determinar el elemento candidato que se debe incluir en la solución parcial utiliza la función o criterio greedy. Dicha función mide la contribución

local de cada elemento a la solución parcial. Generalmente el criterio greedy coincide o se forma a partir del objetivo del problema. Una iteración del método greedy consiste en añadir a la solución el elemento que minimiza, o maximiza en su caso, el criterio greedy.

Existen varias maneras de introducir aleatoriedad a este algoritmo. Uno de los procedimientos más conocidos utiliza una lista restringida de candidatos. Dicha lista está constituida por los elementos candidatos que ofrecen los mejores valores de la función o criterio greedy. El siguiente candidato añadido a la solución se elige aleatoriamente de la lista restringida de candidatos. Tal lista puede tener un número fijo de elementos (restricción por cardinalidad) o consistir de los elementos con los valores de la función greedy comprendidos en un rango dado (restricción por valor).

Otra manera de mezclar una construcción al azar con una construcción greedy consiste en elegir secuencialmente un conjunto parcial de elementos candidatos al azar y después se completa la solución utilizando el algoritmo greedy.

Otro enfoque es mediante perturbación de costos. Primero se perturban aleatoriamente los datos de costos y luego se aplica el algoritmo greedy.

Otro procedimiento de construcción GRASP es el denominado función sesgo, que representa una variación sobre el enfoque de la lista restringida de candidatos basado en el valor. En este procedimiento el elemento de la lista restringida de candidatos se elige al azar entre los candidatos que tienen asignadas probabilidades según su importancia en el proceso. Este mecanismo favorece los elementos bien evaluados. Los elementos de la lista restringida de candidatos se ordenan según el valor de su correspondiente criterio greedy.

La probabilidad de seleccionar el elemento  $x$  es:

$$\pi(r(x)) = \frac{\text{sesgo}(r(x))}{\sum_{x' \in RCL} \text{sesgo}(r(x'))}$$

donde  $r(x)$  es la posición del elemento  $x$  en la lista restringida de candidatos ( $RCL$ ). El sesgo se puede asignar de la siguiente manera:

- Sesgo aleatorio:  $\text{sesgo}(r) = 1$
- Sesgo lineal:  $\text{sesgo}(r) = 1/r$
- Sesgo exponencial:  $\text{sesgo}(r) = e^{-r}$

Para cualquier forma de aleatorización del método greedy escogida, el procedimiento se repite un número prefijado de iteraciones, y se guarda la mejor solución obtenida. De esta forma, se tiene un algoritmo multistart o multi-arranque.

### 2.3.4 Métodos GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedures)

Cuando en cada iteración del método multistart se aplica un procedimiento de búsqueda local a la solución greedy obtenida entonces se tiene un algoritmo GRASP completo. Este método incorpora las dos características principales que se exigen a una metaheurística: la diversificación (obtenida mediante la aleatorización y repetición) y la intensificación (obtenida mediante la búsqueda local). En cada iteración de un algoritmo GRASP se obtiene, como resultado de la búsqueda local, un mínimo local  $y$ , si la aleatorización ha hecho su papel correctamente, se habrán examinado múltiples regiones del espacio de soluciones, de forma que la mejor solución estará cerca del óptimo global.

El método GRASP o Procedimiento de búsqueda miope aleatorizado y adaptativo es una de las metaheurísticas más exitosas que aparecieron en los últimos años del siglo pasado, para resolver problemas difíciles en optimización combinatoria. En su versión básica cada iteración consiste en dos fases: una fase constructiva cuyo producto es una solución factible buena, aunque no necesariamente un óptimo local, y una fase de búsqueda local, durante la cual se examinan vecindades de la solución, y al llegar a un óptimo local la iteración termina. Las iteraciones continúan, guardando la mejor solución encontrada en cada una de ellas, hasta que se alcanza un criterio de terminación.

## 2.4 Algunas de las contribuciones desarrolladas para la localización de terminales de consolidación

### 2.4.1 Programación matemática y heurísticos para la localización de terminales *hub*

En O'Kelly (1987) se plantea una programación entera cuadrática para la resolución de problemas de localización de *hubs* basado en los flujos entre orígenes y destinos. El problema viene definido por  $N_T$  puntos de servicio (nodos), el flujo  $W_{ij}$  entre cada par de nodo terminal  $(i, j)$ , el coste unitario de transporte  $c_{ij}$  específico para cada par de nodos y un número  $h$  de centros de consolidación que deben ser ubicados en el territorio ( $h < N_T$ ). Por otro lado, el coste de transporte entre dos terminales que sean *hubs* se multiplica por un parámetro  $a$  ( $0 < a < 1$ ) para reflejar las economías de escala existentes debido a los menores costes unitarios al utilizar vehículos de mayor capacidad. Paralelamente, se define una variable de decisión binaria  $X_{ik}$  a la que se da valor igual a la unidad si el nodo  $i$  es servido a través del *hub*  $k$  y valor igual a cero en caso contrario. Adicionalmente se considera  $X_{ii} = 1$  si el nodo  $i$  es un *hub* y 0 en caso contrario. Se puede comprobar que, en un caso general, todo punto debe estar servido por un *hub*, no permitiéndose el envío directo entre dos puntos de servicio. La solución del problema discreto recae en encontrar localizaciones de *hubs* y la asignación de los nodos al servicio de los *hub* que minimicen el coste total de transporte. El problema en este caso sería:

$$\text{Min } Z = \sum_i \sum_k \sum_m \sum_j W_{ij} [X_{ij} X_{jm} (c_{ik} + ac_{km} + c_{jm})] \quad (1)$$

sujeto a:

$$\sum_i X_{ik} \leq (N_T - h + 1) X_{kk} \quad \forall k$$

$$\sum_k X_{ik} = 1 \quad \forall i$$

$$\sum_k X_{kk} = h$$

$$0 \leq X_{ik} \leq 1 \quad X_{ik} \text{ variable entera}$$

La herramienta propuesta por O'Kelly (1987) para resolver la ecuación **(1)** son algoritmos heurísticos que deben ser utilizados sistemáticamente para determinar la asignación de los diferentes nodos al conjunto de *hubs*, que realizan una enumeración completa de todas las configuraciones posibles del problema. El problema considerado se caracteriza porque los *hubs* no tienen interacción entre sí y porque se adopta una asignación basada en que cada nodo es servido por el *hub* situado más próximo.

En Aykin (1990) y Aykin y Brown (1992) se analiza críticamente el método propuesto en O'Kelly. En primer lugar, O'Kelly plantea la evaluación de todas las posibles soluciones de asignar los  $N_T$  nodos (delegaciones) del problema a los  $h$  *hubs*. De forma particular, como considera en una primera aproximación dos *hubs*, existen  $N_T(N_T - 1)/2$  posibilidades de asignación a tener en cuenta. Este hecho incrementa significativamente el tiempo computacional en el caso de encontrarnos en problemas de gran tamaño y en problemas con un número significativo de *hubs*.

Adicionalmente, el método propuesto por O'Kelly propone una partición de los nodos en  $h$  grupos de forma que las subregiones no se solapen como criterio de optimalidad ya que cada nodo se asigna al *hub* más próximo. Sin embargo, puede haber problemas en que el método de O'Kelly de asignación de nodos terminales por criterios de proximidad a los *hubs* no contenga la configuración óptima, caracterizada por uno o más nodos no asignados a su *hub* más próximo.

De este modo, en Aykin (1990) se plantea una solución particular de la ecuación **(1)**, definida por el conjunto de nodos delegaciones  $Z_r$  que son asignados al *hub*  $r$ :  $Z_r = \{j : X_{jr} = 1\}$ ,  $r = (N_T - h + 1), \dots, N_T$ .

Para el caso de estudio de interacción entre *hubs*, en Aykin (1990) y Aikin y Brown (1992) se plantea una metodología de solución que determina la asignación de un



nodo  $i$  a un *hub*  $k$  cuando se cumpla la ecuación **(2)** equivalente a que el valor  $A_{ik}$  calculado por la expresión **(3)** sea el mínimo global del sistema.

$$A_{ik} = \min_{1 \leq t \leq h} \{A_{it}\} \quad (2)$$

$$A_{it} = \left( \sum_r \sum_{j \in Z_r} W_{ij} \right) C_{it} + a \left( \sum_{r \neq t} \sum_{j \in Z_r} W_{ij} C_{tr} \right) \quad t = 1, \dots, h \quad (3)$$

La ecuación **(3)** resuelve el problema de asignación de nodos para una localización de *hubs* dada (problema discreto). Sin embargo, se pretende afrontar a la vez la determinación de una localización de *hubs* óptima con una asignación óptima de nodos terminales a estos *hubs*. Por lo tanto, en Aykin y Brown (1992) se analiza el problema inverso, en el que dada una asignación de los distintos nodos delegaciones a *hubs* (agrupación de nodos por zonas asociadas a un *hub*) se pretende determinar la localización óptima de éstos. En este sentido, para determinar el problema de localización se reformula la función objetivo **(1)** y se establece la siguiente ecuación a minimizar:

$$\min \left( \sum_i \sum_k \left( 2X_{ik} \sum_j W_{ij} \right) C_{ik} + \sum_k \sum_t \left( a \sum_i \sum_j W_{ij} X_{ik} X_{jt} \right) C_{kt} \right) \quad (4)$$

Si se asume que el flujo entre nodos es simétrico, esta ecuación se puede simplificar y obtener la siguiente ecuación:

$$\min \left( \sum_i \sum_k (G_{ik} C_{ik}) + \sum_{1 \leq k < t \leq h} L_{kt} C_{kt} \right)$$

donde  $G_{ik} = 2X_{ik} \sum_j W_{ij}$  y  $L_{kt} = 2a \sum_i \sum_j W_{ij} X_{ik} X_{jt}$ .

Se puede comprobar que los valores de  $G_{ik}$  y  $L_{kt}$  son conocidos si se dispone de la asignación de nodos a los distintos *hubs*. De esta forma se plantea un procedimiento iterativo para determinar el vector de coordenadas  $Q_k$  del *hub*  $k$  utilizando para resolver el problema de localización de multiplicidad de almacenes o terminales en distancia Euclídea, mediante la siguiente expresión:

$$Q_k^{h+1} = \frac{\sum_{t \neq k} (L_{kt} Q_t^h / C_{kt}^h) + \sum_i (G_{ik} Q_i^h / C_{ik}^h)}{\sum_{t \neq k} (L_{kt} / C_{kt}^h) + \sum_i (G_{ik} / C_{ik}^h)} \quad k = 1, \dots, h \quad (5)$$

Los superíndices de dicha ecuación representa el número de iteración en la que se encuentra el proceso iterativo.

Con todo, Aykin y Brown (1992) formulan un algoritmo para solucionar el problema global de localización de *hubs* y asignación de nodos terminales a los *hubs*. Este algoritmo resuelve el subproblema de localización de *hubs* y el de asignación de forma separada. La asignación a *hubs* se realiza mediante la ecuación **(2)** analizando únicamente la ubicación de los distintos nodos terminales del problema. De esta forma la interrelación entre *hubs* se mantiene constante y únicamente se necesita determinar el coste asociado a los nodos existentes. Las localizaciones de los *hubs* son sistemáticamente actualizadas mediante la ecuación **(5)**. El algoritmo propuesto para resolver el problema de localización y asignación procede de la siguiente forma:

- **Paso 0.** Se designa una localización inicial de *hubs* con los vectores de posición  $Q_t^0$ ,  $t = 1, \dots, h$ . Se fija  $b = 0$  y un número escalar de terminación del proceso iterativo  $v \geq 0$ . Por otro lado, se determina una asignación inicial  $X_{it}^0$ ,  $i = 1, \dots, N_T$  y  $t = 1, \dots, h$ .
- **Paso 1.** Se reasignan los nodos terminales a los *hubs* utilizando la ecuación **(2)**. Se repetirá la aplicación de la ecuación **(2)** hasta que no se consigan mejores cambios de asignación en los  $X_{it}^{b+1}$ ,  $i = 1, \dots, N_T$  y  $t = 1, \dots, h$ .
- **Paso 2.** Se aplicará la ecuación **(5)** una vez para cada *hub* para actualizar la localización de los *hubs*,  $Q_t^{b+1}$ ,  $t = 1, \dots, h$ .
- **Paso 3.** Parar si  $d(Q_t^{b+1}, Q_t^b) \leq v$  para todo *hub*  $t$  y  $X_{it}^{b+1} = X_{it}^b$  para todo  $i$  y  $t$ . En caso contrario, fijar  $b = b + 1$  y dirigirse al paso 1.

#### 2.4.2 Heurísticos para el problema de localización de $h$ *hubs*

En Klincewicz (1991) se analiza el problema de la localización de  $h$  *hubs* dentro de un conjunto de posibles soluciones ya definidas (identificación de las delegaciones candidatas a ser un *hub*). Se utilizan algoritmos heurísticos para su posible comparación sin la pretensión de encontrar la solución óptima dada la dificultad del problema.

El punto de parada del problema es el mismo definido en O'Kelly (1987). Si se evalúa la suma total del flujo generado o atraído por un nodo terminal genérico  $i$  ( $O_i = \sum_j W_{ij}$ ,  $D_i = \sum_j W_{ji}$ ), la función objetivo **(1)** se puede reformular de la siguiente manera:

$$\text{Min } Z = \sum_i \sum_k X_{ik} C_{ik} (O_i + D_i) + \sum_j \sum_m X_{jm} \sum_i \sum_k [X_{ik} a W_{ij} C_{km}]$$

Se analizan distintos métodos de asignación de cada nodo a la región servida por cada *hub*:

- **Asignaciones basadas en la distancia.**

A nivel general, se asume que los costes por unidad de mercancía transportada son proporcionales a la distancia y por tanto se puede hablar indistintamente de asignación por distancia o por costes. Un ejemplo de este tipo de asignaciones es el propuesto en el heurístico propuesto en O'Kelly (1987) donde se enumeran todas las posibles configuraciones de *hubs*, asignando los nodos a un *hub* en base al criterio de mínima distancia. Sin embargo, este procedimiento es computacionalmente inabordable para aquellos problemas con un número de nodos significativo.

- **Asignaciones multicriterio.**

Para reducir la cantidad de mercancía a transportar entre *hubs*, aquellos pares de nodos que tengan entre ellos un flujo importante de objetos, deben ser transportados por el mismo *hub*. Por lo tanto, se debe incluir un criterio de asignación que contemple esta estrategia en el proceso. En este sentido se define un criterio de asignación multicriterio que integre un criterio de tráfico entre nodos y el criterio de distancia o proximidad. Se debe tener en cuenta en este proceso que los  $h$  *hubs* ya están localizados en la zona de servicio y que únicamente el problema reside en asignar los nodos a los *hubs* ya conocidos. La asignación se realiza por una suma ponderada del tráfico del *hub*  $k$  (mercancía de las delegaciones ya asignadas a  $k$ ) y el valor de la variable definida por el inverso de la distancia del nodo  $i$  al *hub*  $k$ , de forma que la delegación más próxima tenga el máximo valor de esta variable. En todos los casos, el valor de la variable de tráfico y de la distancia más próxima al *hub* se normalizará de forma que el valor máximo sea igual a 1.

La asignación por distancia tiende a minimizar el coste de transporte entre los nodos y el *hub* mientras que la medida de tráfico tiende a minimizar el coste de transporte de los desplazamientos entre *hubs*. La asignación sigue un proceso iterativo, en el que hay una asignación grosera en las primeras etapas que posteriormente se va reevaluando para reducir el valor de la función objetivo.

- **Heurísticos de intercambio.**

Las técnicas descritas anteriormente evalúan todas las posibles configuraciones de asignación de nodos a los  $h$  *hubs* determinados. Sin embargo, se pueden plantear algoritmos heurísticos que únicamente examinen configuraciones que potencialmente produzcan alguna mejora sobre la mejor solución actual encontrada en el proceso de optimización.

En este caso se permite el cambio de las delegaciones que actúan como *hub*. Las únicas configuraciones que se evalúan son aquellas que difiere en la localización de uno o dos *hubs* en relación a la mejor solución actual adoptada. La decisión de intercambiar nodos que actúen como *hubs* se basa en una variable de mejora local. Esta variable local determina el ahorro en la función objetivo si algún nodo  $q \notin H$  reemplaza simplemente otro nodo  $r \in H$  como *hub* (o  $q_1, q_2 \notin H$  reemplazan a  $r_1, r_2 \in H$ ), manteniendo la misma asignación para el resto de nodos. Se parte de la evaluación del tráfico total *interhub* para la

solución actual. El tráfico desde el *hub*  $k$  al *hub*  $l$  queda determinado por la siguiente expresión:

$$I_{kl} = \sum_{\{i|X_{ik}=1\}} \sum_{\{j|X_{jl}=1\}} W_{ij}$$

Si se asume que  $H^0$  es el conjunto de *hubs* de la configuración de la solución actual, los ahorros producidos por el reemplazo del nodo  $r$  por el nodo  $q$  se puede evaluar por la siguiente expresión:

$$R_{qr} = \sum_{\{i|X_{ir}=1\}} O_i(C_{ir} - C_{iq}) + \sum_{\{i|X_{ir}=1\}} D_i(C_{ri} - C_{qi}) + \sum_{\substack{k \in H^0 \\ k \neq r}} I_{rk}a(C_{rk} - C_{qk}) + \sum_{\substack{k \in H^0 \\ k \neq r}} I_{rk}a(C_{kr} - C_{kq})$$

El reemplazo de un nodo que actúe como *hub* por otro implica que se debe aplicar un algoritmo de asignación de nodos a los *hubs* en cada iteración de cambio.

- **Heurísticos de zonificación-agrupación.**

Los heurísticos de intercambio y el de enumeración propuesto por O'Kelly (1987) determinan en primer lugar  $h$  puntos potenciales de funcionar como *hub* y posteriormente asignan los restantes nodos al servicio de cada *hub*. Sin embargo, los algoritmos de zonificación-agrupación en primer lugar establecen  $h$  grupos de nodos y posteriormente escogen la localización del nodo de cada grupo que actuará como *hub*.

Se destaca el estudio realizado por Monma y Sheng (1986) en el que se propone un método de asignación de los nodos a las  $h$  particiones del territorio (*clústeres*) basado en la asignación multicriterio desarrollada anteriormente. En este caso, debido a que las localizaciones de los *hubs* no se conocen de antemano, la medida del criterio de distancia del heurístico de zonificación se realiza en el centro de gravedad de cada partición (*clúster*). Conociendo las coordenadas de cada nodo  $i$ , el centro de gravedad de la partición  $l$  tiene las coordenadas calculadas por la expresión siguiente. El centro de gravedad minimiza las distancias al cuadrado pero se considera una aproximación suficiente del problema de las medianas.

$$(X_G, Y_G) = \left( \frac{\sum_{i \text{ en cluster } l} (O_i + D_i)x_i}{\sum_{i \text{ en cluster } l} (O_i + D_i)}, \frac{\sum_{i \text{ en cluster } l} (O_i + D_i)y_i}{\sum_{i \text{ en cluster } l} (O_i + D_i)} \right)$$

El algoritmo se basa en los siguientes pasos:

- **Paso 0. Inicialización.** Se empieza con  $p$  nodos llamados semillas para las  $h$  particiones realizadas, por ejemplo, los nodos con mayor  $O_i + D_i$ , determinando unos pesos de la asignación por distancia  $w_1, w_2$  tal que  $w_1 + w_2 = 1$ .
- **Paso 1. Asignación.** Se repite para cada nodo  $i$  el siguiente proceso:

- Para cada *clúster*  $k$ , se calcula el inverso de la distancia desde el nodo  $i$  hasta el centro de gravedad de  $k$ . Se normalizan las distancias inversas que se expresan como  $D_{ik}$  para  $k = 1, \dots, h$ .
- Para cada *clúster*  $k$ , se calcula el tráfico total intercambiado con los nodos ya presentes en  $k$  ( $\sum_{j \text{ en cluster } k} (W_{ij} + W_{ji})$ ), normalizando la medida para que el máximo sea igual a la unidad y denominándolos  $T_{ik}$  para  $k = 1, \dots, h$ .
- Para cada *clúster*  $k$ , calcular  $G_{ik} = w_1 D_{ik} + w_2 T_{ik}$ .
- Asignar  $i$  al *clúster* con un valor máximo de  $G_{ik}$ .
- Paso 2. Estudio de asignación. Para cada nodo  $i$  se debe realizar el siguiente cálculo: para cada *clúster*  $k$ , se calculan los ahorros  $S_{ik}$  que resultarían si  $i$  es reasignado a  $k$  en lugar de al *clúster* actual, asumiendo que el *hub* estaría localizado en el centro de gravedad.
- Paso 3. Adopción del mejor candidato para la reasignación. Se escoge el máximo  $S_{ik}$  de entre todos los nodos  $i$  y todos los *clústeres*  $k$ .
- Paso 4. Reasignación. Si  $S_{ik} > 0$ , se reasigna el nodo  $i$  al *clúster*  $k$  y se repite el Paso 2. En caso contrario se va al Paso 5.
- Paso 5. Elección de hubs. Para cada *clúster* se escoge el nodo más cercano al centro de gravedad para ser el *hub* de la partición. De este modo, se asignarán todos los nodos de aquella partición a su *hub*.

En Klinecicz (1991) se realiza adicionalmente un análisis comparativo de los resultados de aplicación de los heurísticos detallados a un conjunto de problemas. Una parte de estos problemas derivan de configuraciones de aeropuertos de Estados Unidos y otras de ejemplos hipotéticos de distribuciones logísticas. A nivel general, los mejores resultados se obtienen con los heurísticos de enumeración, sin embargo el gran requerimiento de tiempo computacional para llegar a la solución lo desaconsejan para problemas de gran tamaño. En particular, para configuraciones superiores a los 25 nodos y 4 *hubs* ya no se opta por este cálculo. Para estos casos que deben ser solucionados repetidamente o para problemas de gran tamaño se propone el heurístico de doble intercambio como técnica de solución para la localización de  $h$  *hubs*. La calidad de la solución es buena y el tiempo computacional se mantiene en valores asumibles.

### 2.4.3 Programación matemática para la localización de terminales de consolidación o *hubs* y asignación de envíos a rutas

En Aykin (1995) se analiza el problema de la localización de *hubs* y de rutas en el plano  $\mathbb{R}^2$  permitiendo que los flujos de carga a transportar entre dos puntos se consoliden en uno o dos *hubs* o que sean entregados directamente sin realizar ninguna parada para la consolidación de carga. En este problema se considera que las rutas en las que se permite el envío directo (sin pasar por ningún *hub*) son conocidas de antemano.

En este contexto el problema se basa en determinar el tipo de servicio (directo, con parada en un *hub* o en dos) entre los puntos de demanda y la localización de cada *hub*, de forma que se minimicen los costes de transporte. Se propone un algoritmo de resolución basado en 4 métodos de determinación de la solución inicial. La localización de los *hubs* se permite en todo el espacio de soluciones.

Se consideran las siguientes variables y parámetros:

$P_i \in \mathbb{R}^2$ , coordenadas de localización del punto de demanda  $i$  ( $i = 1, \dots, N_T$ )

$c_{ik}$ , coste de transporte directo de  $i$  a  $k$  por unidad de flujo y distancia ( $\text{€}/\text{m}^3\text{-km}$ )

$W_{ij}$ , flujo total entre  $i$  y  $j$

$Q_k \in \mathbb{R}^2$ , coordenadas de localización del *hub*  $k$  ( $k = 1, \dots, h$ )

$a_1, a, a_2 \in [0, 1]$ , constantes de proporcionalidad que determinan respectivamente las economías de escala para los segmentos de la cadena de transporte origen de ruta-*hub*, conexión *hub-hub* y *hub-final* de ruta respectivamente ( $a \leq a_1, a_2$ )

$F_D$ , conjunto de rutas  $(i, j)$  en las que es permitido un servicio directo sin paradas en *hub*. En este sentido, se define la variable discreta  $O_{ij}$  que toma valores iguales a 1 si  $(i, j) \in F_D$  y 0 en caso contrario.

Las variables de decisión que determinan si un envío es realizado a través de uno o dos *hubs* son las siguientes:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el flujo de } i \text{ a } j \text{ es enviado directamente} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

$$X_{iktj} = \begin{cases} 1 & \text{si el flujo de } i \text{ a } j \text{ es enviado de } i \rightarrow \text{hub } k \rightarrow \text{hub } t \rightarrow j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

La variable de decisión  $X_{iktj}$  es definida para los puntos de demanda  $i, j = 1, \dots, N_T$ ,  $i \neq j$ , y para los *hubs*  $k, t = 1, \dots, h$ . En el caso de que  $t = k$ , representa que el envío únicamente realiza una parada en el *hub*  $k$ . En esta situación, el problema de transporte se puede formular de la siguiente forma:

### Problema P1

$$\text{Min } Z = \sum_i \sum_j O_{ij} W_{ij} c_{ij} d(P_i, P_j) X_{ij} + \sum_i \sum_k \sum_t \sum_j W_{ij} (a_1 c_{ik} d(P_i, Q_k) + a c_{kt} d(Q_k, Q_t) + a_2 c_{tj} d(Q_t, P_j)) X_{iktj}$$

$$\text{sujeto a:} \quad O_{ij} X_{ik} + \sum_k \sum_t X_{iktj} = 1 \quad \forall i, j$$

$$Q_k \in \mathbb{R}^2 \quad \forall k, X_{ij}, X_{iktj} \in [0, 1]$$

El primer término de la función objetivo representa el coste de los envíos directos, mientras que el segundo identifica el coste de los envíos realizados a través de uno o dos *hubs*. Si se define el número total de pares de puntos en el que se permite un envío directo por  $|F_D| = d^*$ , el número total de variables binarias utilizadas en el problema es de  $h^2 N_T(N_T - 1) + d^*$  y el número de variables de decisión continuas es de  $2h$ . Este hecho implica que para valores razonablemente altos de puntos de servicio y *hubs* la resolución del problema supone un tiempo computacional prohibitivo.

Sin embargo, Aykin (1995) plantea que el problema se puede descomponer en un número de subproblemas de caminos mínimos que implican decisiones de servicio si se permite fijar la localización del *hub*. En este sentido, si la localización de los *hubs* es conocida, el problema se reduce a resolver con programación matemática entera las variables de decisión sobre tipo de servicio (envío directo o a través de *hub*).

### Problema P2

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= \sum_i \sum_j O_{ij} W_{ij} C_{ij} X_{ij} + \sum_i \sum_k \sum_t \sum_j W_{ij} C_{iktj} X_{iktj} \\ \text{sujeto a: } & O_{ij} X_{ik} + \sum_k \sum_t X_{iktj} = 1 \quad \forall i, j \\ & X_{ij}, X_{iktj} \in [0, 1] \text{ variables enteras} \quad \forall i, j, k, t \end{aligned}$$

donde  $C_{ij} = c_{ij}d(P_i, P_j)$  y  $C_{iktj} = (a_1 c_{ik}d(P_i, Q_k) + a_2 c_{kt}d(Q_k, Q_t) + a_2 c_{tj}d(Q_t, P_j))$ . Conociendo la posición de los *hubs*, la determinación de la distancia entre puntos de demanda y *hubs* es directa. La solución para este problema se puede obtener descomponiéndolo en problemas de caminos mínimos de menor tamaño, uno para cada ruta y posteriormente escoger el servicio de menor coste según las variables discretas definidas a continuación:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } (i, j) \in F_D \text{ y } C_{ij} = \min_{u,v} \{C_{ij}, C_{iuvj}\} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (6)$$

$$X_{iktj} = \begin{cases} 1 & \text{si } (i, j) \in F_D \text{ y } C_{iktj} = \min_{u,v} \{C_{ij}, C_{iuvj}\} \\ 1 & \text{si } (i, j) \notin F_D \text{ y } C_{iktj} = \min_{u,v} \{C_{iuvj}\} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (7)$$



De esta forma, dada una solución del problema, con un conjunto de rutas directas  $S_{00} = \{(i,j): X_{ij} = 1\}$  y un conjunto de rutas entre *hubs*  $S_{kt} = \{(i,j): X_{iktj} = 1\}$ , la función objetivo del Problema P1 puede reescribirse mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Min } Z = \sum_{(i,j) \in S_{00}} W_{ij} c_{ij} d(P_i, P_j) + \sum_k \sum_t \sum_{(i,j) \in S_{kt}} W_{ij} (a_1 c_{ik} d(P_i, Q_k) + a c_{kt} d(Q_k, Q_t) + a_2 c_{tj} d(Q_t, P_j))$$

### Problema P3

Analizando la última ecuación se deduce que el primer término es constante ya que únicamente representa las rutas directas. De este modo, si se define  $\mu_w$  como el primer término, y se reescribe el segundo término, tenemos el siguiente problema:

$$\text{Min } Z = \sum_k \sum_t V_{kt} d(Q_k, Q_t) + \sum_i \sum_k U_{ik} d(P_i, Q_k) + \mu_w$$

donde:

$$V_{kt} = a \sum_{(i,j) \in S_{kt}} c_{kt} W_{ij} \quad y \quad U_{ik} = a_1 \sum_t \sum_{(i,j) \in S_{kt}} c_{ik} W_{ij} + a_2 \sum_t \sum_{(j,i) \in S_{tk}} c_{ki} W_{ji}$$

Este problema es del tipo de localización de diversas instalaciones con localizaciones desconocidas de los *hubs*  $Q_k \in E^2, k = 1, \dots, h$ . Para solucionar este problema en métrica Euclídea, se propone un método iterativo basado en el procedimiento de Weiszfeld detallado en Ballou (1991) que utiliza la siguiente ecuación para determinar las coordenadas  $Q_k^{b+1}$  de la terminal  $k$  en la iteración  $b + 1$ :

$$Q_k^{b+1} = \frac{\sum_{t \neq k} \frac{(V_{kt} + V_{tk})}{\|Q_k^b - Q_t^b\|} Q_t^b + \sum_i \frac{U_{ik}}{\|Q_k^b - P_i\|} P_i}{\sum_{t \neq k} \frac{(V_{kt} + V_{tk})}{\|Q_k^b - Q_t^b\|} + \sum_i \frac{U_{ik}}{\|Q_k^b - P_i\|}} \quad k = 1, \dots, h \quad (8)$$

En este sentido, en Aykin (1995) se propone el algoritmo *Location-Routing* basado en un procedimiento iterativo a partir de una solución inicial que se puede resumir en los siguientes pasos:

- **Paso 0.** Se determina un conjunto de localizaciones iniciales de *hubs*  $\{Q_1^0, \dots, Q_p^0\}$  y unas tolerancias  $\vartheta, \varepsilon > 0$  y  $b = 0$ .
- **Paso 1.** Dadas las localizaciones de *hubs*  $\{Q_1^b, \dots, Q_p^b\}$ , se resuelve el Problema P2 utilizando los valores **(6)** y **(7)** para determinar  $S_{00}^b$  y  $S_{kt}^b \quad \forall k, t$ . Si  $b = 0$ , se va al paso 2. Si  $b > 0$  y  $S_{00}^b = S_{00}^{b-1} \quad \forall k, t$ , entonces se para.

- **Paso 2.** Utilizando  $S_{00}^b$  y  $S_{kt}^b$  del paso 1, se reduce el problema al Problema P3. Se establece  $r = 1$  y  $Q_k^r = Q_k^b$ ,  $k = 1, \dots, h$ .
- **Paso 3.** Calcular  $Q_k^{(r+1)}$ ,  $k = 1, \dots, h$  utilizando la ecuación **(8)**.
- **Paso 4.** Si  $\|Q_k^{(r+1)} - Q_k^r\| > \vartheta$  para algún  $k$ , establecer  $r = r + 1$  e ir al paso 3. En caso contrario  $Q_k^{(b+1)} = Q_k^{(r+1)}$ ,  $k = 1, \dots, h$ ,  $b = b + 1$ , e ir al paso 1.

Los procedimientos mencionados para los problemas P2 y P3 garantizan una solución óptima. Sin embargo, la solución encontrada con el algoritmo *Location-Routing* no garantiza la solución óptima del problema P1 ya que las localizaciones de *hubs* y la estructura de la ruta no se determinan conjuntamente.

#### 2.4.4 Extensión de los modelos de programación matemática

- **Capacidad limitada.**

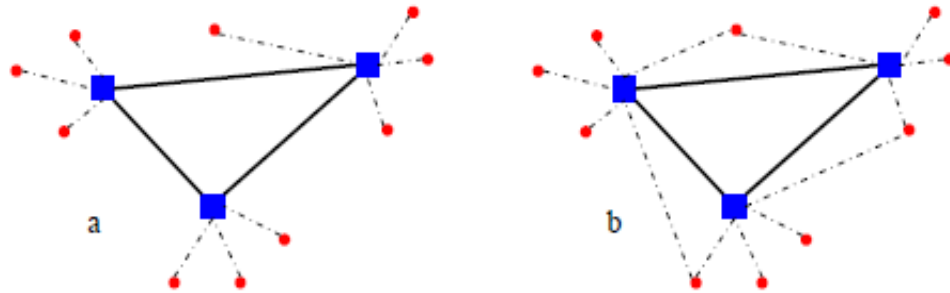
En Aykin (1994) se plantea el problema de localización de servicios e infraestructuras (*hubs*) de capacidad limitada con interacción entre *hubs*, además de admitir una política de envío directo entre puntos de servicio y políticas de parada múltiple en uno o más *hubs*. Los *hubs* se asumen que tienen una capacidad limitada de encaminar los flujos hacia su destino. De este modo, el problema se basa en determinar para cada par de delegaciones el tipo de servicio (directo o vía *hub*) y la localización de los *hubs* de forma que se minimice el coste total de la distribución. Si  $Y_i$  es una variable entera binaria que toma el valor 1 cuando la terminal  $i$  es *hub* y 0 en caso contrario, se define la variable  $r_k(Y_i, Y_t, Y_j)$  como la capacidad necesaria en el *hub*  $k$  si el flujo de  $i$  a  $j$  es enviado desde  $i$  al *hub*  $k$  y posteriormente al *hub*  $t$  (siendo  $k$  el primer *hub* en la ruta). De la misma forma,  $s_k(Y_i, Y_t, Y_j)$  es la capacidad necesaria en  $k$  si el flujo de  $i$  a  $j$  es enviado desde  $i$  al *hub*  $t$  y posteriormente al *hub*  $k$ .

Las capacidades  $r_k$  y  $s_k$  están expresadas en función de  $Y_i$  ya que dependen de si los nodos  $i, j$  ya son propiamente un *hub* y si coinciden con los *hubs* de análisis ( $i = k, i = t, j = k$  o  $j = t$ ). De este modo, se añade a la formulación de Aykin (1995) una restricción adicional en la que la valoración de  $r_k(Y_i, Y_t, Y_j)$  y  $s_k(Y_i, Y_t, Y_j)$  para  $\forall i, j \in N; t \in H$  no debe superar la capacidad nominal del *hub*  $k$ .

En el artículo en cuestión se plantean distintas técnicas de resolución que simplifican el modelo y pueden evaluar una solución óptima. La técnica de Relajación Lagrangeana del problema permite articular en dos partes su resolución: la determinación de las localizaciones de los *hubs* y los tipos de servicio o envío de cada par de nodos. En este sentido, si la localización de los *hubs* es conocida, el problema se reduce a resolver con programación matemática entera el tipo de servicio (envío directo o a través de *hub*).

- **Asignación múltiple.**

En O'Kelly et al (1996) se analizan las propiedades de las redes entre terminales y, mediante un conjunto de ejemplos numéricos, se enumeran una serie de propiedades de estas redes. Se parte del problema propuesto por O'Kelly (1987) asumiendo que todos los *hubs* están interconectados, que no se permite el envío directo entre clientes y que se permite tanto la asignación simple de un punto a un sólo *hub* o la asignación múltiple en la que un punto puede ser servido por dos o más *hubs*. El estudio teórico analítico de asignación múltiple está extensamente desarrollado en Campbell (1997).



Ejemplos de redes: (a) Asignación simple de los nodos a un sólo *hub*.  
(b) Asignación múltiple de un nodo a más de un *hub*.

- **Costes no lineales.**

En O'Kelly y Bryan (1998) se propone una modelización analítica de los costes en la red con *hubs* que permita considerar costes unitarios variables. En este sentido, los coeficientes de coste se multiplican por un factor  $\Omega$  que decrece a medida que el flujo en el arco es mayor. La base de la metodología es hacer depender los costes de los arcos entre *hubs* con el flujo que circula a través de ellos, y reproducir la reducción de costes unitarios por efecto de la consolidación de carga en los arcos *interhub*.

$$\Omega = \left[ 1 - \theta \left( \frac{\sum_i \sum_j W_{ij} X_{ijkm}}{\sum_i \sum_j W_{ij}} \right)^\beta \right]$$

donde

$W_{qr}$	Flujo total que se transporta entre los nodos $q$ y $r$
$X_{qrkm}$	Variable que toma el valor de 1 si los flujos entre el nodo $q$ y el nodo $r$ son enviados vía los <i>hubs</i> $k$ y $m$ , y 0 en caso contrario.
$\theta, \beta$	Parámetros $\theta > 0, \beta > 0$
$\sum_i \sum_j W_{ij} X_{ijkm}$	Flujo total transportado a través del arco <i>interhub</i> $(k, m)$
$\sum_i \sum_j W_{ij}$	Flujo total de la red

### 2.4.5 Algoritmos metaheurísticos para el problema de localización y asignación a rutas

Los algoritmos metaheurísticos son unos métodos matemáticos de resolución de problemas de optimización combinatoria de amplia utilización en problemas de rutas (como el *Vehicle Routing Problem*, VRP, o el *Travelling Salesman Problem*, TSP) o en la asignación y gestión de flotas. Partiendo de una función objetivo a optimizar, los algoritmos metaheurísticos realizan un procedimiento de búsqueda de soluciones o estados. Al conjunto de todos los estados o soluciones candidatas se les llama espacio de búsqueda.

Este grupo de algoritmos se caracteriza por trabajar en un instante de ejecución con un estado actual que es variado por uno nuevo por medio de una transición de estado, movimiento o perturbación. La transición de estado o movimiento tiene como objetivo explorar nuevas configuraciones que aporten ahorros significativos en la función de coste en el subdominio de soluciones próximo al estado actual. Los algoritmos metaheurísticos varían y aceptan las configuraciones asociadas a los cambios de estado según procedimientos probabilísticos. En la mayoría de casos, los algoritmos permiten un incremento positivo en la función de coste a costa de poder explorar nuevos dominios de la solución, superar óptimos locales y de este modo alcanzar el óptimo global de la solución (búsqueda colina arriba). Los más conocidos son: el Recocido Simulado (*Simulated Annealing*), los Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithms*), la Búsqueda Tabú (*Tabu Search*), y la Colonia de Hormigas (*Ant Colony Optimization*).

#### 2.4.5.1 Recocido Simulado (Simulated Annealing, SA).

El Recocido Simulado (Simulated Annealing, SA, también traducido a veces como Cristalización Simulada) es un método iterativo que genera aleatoriamente modificaciones de la solución actual y las somete a reglas de probabilidad para su aceptación, evitando de esta manera la caída en óptimos locales. Este método pertenece a la familia de probabilísticos de *hill-climbing* (colina arriba), porque permite la aceptación de movimientos o cambios de la solución que impliquen un sobrecoste en la métrica de evaluación o función de costes para evitar limitar la exploración a los extremos locales.

El SA desarrollado en Kirkpatrick et al. (1983) se basa en la analogía con el recocido de los metales y consiste en "calentar" a alta temperatura el sistema a optimizar, para luego disminuir la temperatura muy lentamente para permitir la cristalización y ordenamiento óptimo de la estructura del sistema con mínimo coste. La variable de control del proceso y, en analogía, del modelo de optimización es la temperatura.

La reducción de temperatura en el proceso físico se reproduce de forma discreta en el modelo (a saltos). De este modo, la probabilidad que marca el criterio de aceptación de la solución depende del estado del sistema, esto es, de la variable temperatura. En estados iniciales (alta temperatura) el criterio de aceptación permite incluir

movimientos que incrementan el coste del sistema; mientras que en estados avanzados del proceso (baja temperatura) las soluciones con coste superior a la mejor solución tienen una probabilidad de aceptación casi nula. El criterio de finalización se basa en la convergencia de la solución a un valor determinado o al cumplir un cierto número de iteraciones. Se ha demostrado que bajo ciertas condiciones este proceso converge asintóticamente al óptimo global con probabilidad uno (Mitra *et al.*, 1986). La demostración de este resultado se basa en el hecho de que el SA puede considerarse como un algoritmo que continuamente intenta transformar la configuración actual en una de sus configuraciones vecinas. Este mecanismo puede ser fácilmente descrito por medio de una cadena no estacionaria de Markov o una secuencia de cadenas homogéneas de Markov.

Aykin (1995b) propone una herramienta computacional para la localización óptima de  $h$  hubs y la asignación de  $N_T$  nodos o terminales a estos hubs basada en el algoritmo del SA desarrollado en Kirkpatrick *et al.* (1983). El "Simulated Annealing Based Greedy-Interchange Heuristic" (SAGI) propuesto por Aykin se articula en dos fases diferenciadas: la construcción de una solución inicial y el proceso de refinamiento de esta solución inicial.

- **Solución inicial.**

El algoritmo parte de una configuración inicial en la que se considera que cada nodo terminal puede actuar como hub de forma que  $h = N_T$ . En esta configuración, se determina para cada hub el incremento de coste que se produciría si éste no actuara como tal, es decir, si no existiera, y la carga se consolidara en el resto de hubs del sistema de transporte.

En un segundo paso, el algoritmo elimina o "cierra" el hub que tiene asociado un menor incremento de coste en la función de costes del sistema. Este procedimiento se va repitiendo iterativamente reasignando los nodos que estaban asignados al hub clausurado al nuevo conjunto de hubs hasta quedar una configuración de  $h$  hubs en el territorio. Para proceder a la asignación de cada nodo terminal  $i$ , se determina la variable  $A_{i,r}$  de forma similar a la que se hacía en la formulación y metodología de asignación propuesta por Klinecivic (1991) (ecuación (2)). De esta forma se asigna el nodo delegación  $i$  al hub  $r \in H$  que presente un valor inferior de la variable  $A_{i,r}$  en cada iteración determinada según la expresión siguiente: (9)

$$A_{i,r} = \min_{k \in H} \{A_{i,k}\} = \min \left\{ \sum_{t \in H} \sum_{j \in K_t} (a_1 W_{i,j} + a_2 W_{j,i}) C_{i,k} + \sum_{\substack{t \in H \\ t \neq k}} \sum_{l \neq i} a (W_{i,l} + W_{l,i}) C_{k,t} \right\} \quad \forall i \in K_r, r \in H$$

donde:

$A_{i,k}$  Coste de transporte de la carga con origen o destino en el nodo delegación  $i$  si éste está asignado al hub  $k$ .

$H$  Conjunto de hubs.

$K_t$  Conjunto de nodos delegación asignados al hub  $t$ .

En este caso, se generan los pesos  $a_1, a_2, a$  asociados a los costes de transporte para computar de forma diferencial los envíos desde la terminal origen  $i$  al *hub*  $k$ , los envíos desde el *hub*  $t$  a la terminal destino  $j$ , y el coste del transporte entre *hubs* respectivamente.

- **Proceso de mejora.**

Esta etapa del algoritmo es propiamente la aplicación del SA y trata de realizar transiciones de estado o movimientos en la solución actual entre el conjunto de *hubs* y el conjunto de nodos terminales que no son *hubs*. El movimiento en sí trata de analizar el incremento de coste provocado al considerar como *hub* una delegación  $r \notin H$  en sustitución de un *hub*  $k \in H$ . Para determinar cuándo es rentable el cambio de un nodo  $k \in H$  con el nodo  $r \notin H$  en el movimiento de cambio de *hub*, se analiza aquel *hub*  $t \in H$  que presente un valor máximo del coeficiente  $R_{t,r}$  según la siguiente expresión: **(10)**

$$U_{t,r} = \max_{k \in H} \{R_{k,r}\} = \max_{k \in H} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{\{i|Z_{i,r}=1\}} O_i(C_{i,r} - C_{i,k}) + \sum_{\{i|Z_{i,r}=1\}} D_i(C_{r,i} - C_{k,i}) + \\ + \sum_{\substack{n \in N \\ n \neq r}} I_{r,n}a(C_{r,n} - C_{k,n}) + \sum_{\substack{n \in N \\ n \neq r}} I_{n,r}a(C_{n,r} - C_{n,k}) \end{array} \right\}$$

donde:

$I_{n,l} = \sum_{\{i|Z_{i,n}=1\}} \sum_{\{j|Z_{j,l}=1\}} (W_{i,j})$  es la carga que va desde el *hub*  $n$  al *hub*  $l$ .

$W_{i,j}$  es el volumen de mercancía que se envía desde  $i$  hasta  $j$ .

$O_n$  es la suma de la mercancía que se envía desde el nodo terminal  $n$

$D_n$  es la suma de la carga que tiene como destino final el nodo terminal  $n$

$Z_{i,n} = \begin{cases} 1 & \text{si el nodo terminal } i \text{ está asignado al } \textit{hub} \ n \\ 0 & \text{en los demás casos} \end{cases}$

Si  $U_{t,r} \geq 0$ , el *hub*  $t$  se elimina de la solución y es sustituido por el *hub*  $r$  ya que el movimiento o transición de estado produce una reducción de costes del sistema. En el caso de que la variable sea igual a cero, los costes podrían aumentar, disminuir o mantenerse.

Sin embargo, en el caso de que  $U_{t,r} < 0$ , la función de costes se verá incrementada de modo que el algoritmo determina una probabilidad de aceptación  $p$  del intercambio entre *hubs* ( $0 < p < 1$ ) basada en la distribución de densidad de probabilidad de Boltzmann. El criterio de aceptación de la solución queda determinado, pues, por la siguiente ecuación: **(11)**

$$p = \begin{cases} \exp\left(\frac{U_{t,r}/Z_{min}}{T}\right) & \text{si } U_{t,r} < 0 \\ 1 & \text{si } U_{t,r} \geq 0 \end{cases}$$

donde:

$Z_{min}$  es el valor mínimo obtenido de la función de costes de transporte

$T$  es parámetro de control (o temperatura)

El proceso empieza actualizando la asignación de los *hubs* con la ecuación (9) de forma que si el costo de la solución obtenida es mejor que los encontrados hasta el momento, el nodo  $r$  sustituye al *hub*  $t$  y se actualiza la solución. Si sucede lo contrario, la solución se mantiene igual. El parámetro inicial de control ( $T$ ) se obtiene especificando la probabilidad de no examinar un intercambio para aquellos casos en que la función de ahorro indica un incremento del  $100\delta\%$  en el valor de la función objetivo (siendo  $\delta = U_{t,r}^*/Z_{min}$ ). Para calcular el parámetro temperatura  $T$  en cada iteración  $t + 1$  del proceso, se evalúa la condición de rechazo  $R(\delta)$  en la iteración  $t$  mediante la siguiente ecuación, considerando adicionalmente el parámetro  $\vartheta$  ( $\vartheta > 1$ ) como una constante de enfriamiento del proceso:

$$P(R(\delta))_{t+1} = \vartheta P(R(\delta))_t$$

En este proceso, si se determina una solución mejor con  $U_{t,r} < 0$ , el parámetro de control  $T$  se actualiza en la iteración  $t + 1$  del proceso por medio de la expresión siguiente, de forma que la probabilidad de rechazo se incremente a medida que el proceso iterativo avanza:

$$T = \frac{-\delta}{\ln(1 - P(R(\delta))_{t+1})}$$

En Ernst y Krishnamoorthy (1999) también se desarrolla un primer análisis sobre la localización de *hubs* con capacidad limitada con clientes asignados a un solo *hub* (asignación simple) con un algoritmo basado en el Simulated Annealing y en el descenso aleatorio.

En este caso, se parte de una solución inicial escogiendo de forma arbitraria entre el 10 y el 90% de los nodos como *hubs*. El resto de nodos son asignados aleatoriamente a estos *hubs* iniciales. Posteriormente, para determinar y explorar el dominio más próximo de la solución, se definen un conjunto más completo de movimientos o cambios de estado que en Aykin (1995a). De esta forma, se consideran 6 tipos de transiciones de la solución actual siempre que no violen las restricciones de capacidad:

- **Reubicación del *hub*:** Cambia la localización de un *hub* dentro de un *clúster* (o región de servicio) a otro nodo de forma aleatoria dentro del *clúster*.
- **Reasignación de nodo:** Cambia la asignación de un nodo que no es *hub* (escogido aleatoriamente) a otro *clúster*. Si el *clúster* contiene únicamente aquel nodo, se permite asignar el nodo a otro *clúster* y eliminar el *clúster* actual.
- **Nuevo *hub*:** Crea un nuevo *clúster* con un solo nodo haciéndolo a su vez *hub*.
- **Fusión de *clústeres*:** Se unen dos *clústeres* aleatoriamente escogidos por medio de la asignación de todos los nodos de un *clúster* al *hub* del otro *clúster*.
- **Partición de *clústeres*:** Se divide un *clúster* en dos *clústeres*, por medio de la asignación de algunos de los nodos en el *clúster* original a un nodo que no era *hub* pero que en el nuevo *clúster* va a ser *hub*.



- **Intercambio de nodos:** Intercambia las asignaciones de dos nodos que no son *hubs* entre distintos *clústeres*. Cada nodo es asignado al *hub* del otro nodo.

El criterio de aceptación de la solución actual en cada iteración es el mismo marcado por la ecuación **(11)**. En este caso, se constata que el método del Recocido Simulado no explora todo el dominio de soluciones y, por lo tanto, se repite varias veces el procedimiento sobre soluciones iniciales diferentes.

El método del Descenso Aleatorio (RDH), a diferencia del Recocido Simulado que puede llegar a aceptar soluciones que comporten un empeoramiento local de la solución, siempre exige que una nueva solución comporte un beneficio de la solución. El método RDH, a partir de una solución inicial arbitraria, aplica los mismos 6 movimientos. Al aplicar uno de los movimientos, se acepta la configuración realizada como nueva solución si comporta una mejora en la función objetivo. Cabe destacar que este procedimiento es diferente de la heurística Greedy, ya que el primero no busca la mejor solución posible en cada iteración sino una solución mejor arbitrariamente.

Los dos heurísticos planteados por Ernst, A.T., y M.Krishnamoorthy (1999) se aplicaron 10 veces a un subconjunto de varios nodos ( $10 < N_T < 50$ ) derivado de un problema base de reparto de correos con 200 nodos. Como conclusión, el algoritmo de RDH produce la mejor solución en problemas de tamaño pequeño o mediano (hasta 50 puntos de servicio), a pesar de un tiempo computacional más elevado. Sin embargo, para problemas habituales que afecten a 200 nodos o más, el algoritmo del descenso aleatorio no produce buenos resultados ni se resuelve con un tiempo computacional adecuado.

#### 2.4.5.2 Algoritmos genéticos (GA)

Los algoritmos genéticos hacen evolucionar un estado actual compuesto por varios individuos (soluciones) sometidos a acciones aleatorias semejantes a las que actúan en la evolución biológica (mutaciones y recombinaciones genéticas), a la vez que se establece un criterio de selección por el cual se decide qué individuos sobreviven y qué individuos son descartados. En este sentido, el GA se distingue claramente de todos los metaheurísticos básicamente por el hecho de que en cada iteración se tiene un conjunto de soluciones, o población de individuos y no una única solución en curso. Las soluciones sucesoras se obtienen a partir de la combinación de atributos (cadenas de nodos) de los elementos de la población de soluciones y no mediante la transformación de la solución en curso. La información es encriptada o codificada en forma de cadena, generalmente binaria, llamada cromosoma. La globalidad de símbolos presentes en la cadena (nodos) se denominan genes.

La selección de las diversas soluciones que se utilizan en la generación de una nueva solución sucesora se realiza mediante la definición de una función que evalúa la bondad y ajuste de cada solución de la población, *la función fitness*  $f_f$ . En este caso, la función fitness será una función decreciente con el coste de cada solución. De este

modo, la probabilidad de selección de una solución de la población en curso es proporcional al valor de la función fitness, mediante la Regla de la Ruleta. Si  $S$  es el conjunto o la población de soluciones en curso, se asigna a cada solución  $s^* \in S$  un sector circular de ángulo  $\alpha_{s^*}$  determinado por la siguiente ecuación:

$$\alpha_{s^*} = (2\pi) \frac{f_f(s^*)}{\sum_{s \in S} f_f(s)}$$

De este modo, en cada momento que se quiera seleccionar una solución de la población, se "tirará la ruleta", es decir, se generará un número aleatorio entre 0 y  $2\pi$  radianes y se escogerá la solución que tenga el sector circular asociado a este valor.

La transición de estado para crear las siguientes generaciones se realizan a partir de dos movimientos o operadores: el operador de cruzamiento (se intercambian subcadenas de 2 cromosomas) y el operador de mutación (cambia uno o varios genes de un cromosoma).

Una vez se ha incrementado la población, ésta se debe reducir a un tamaño conveniente, eligiendo un cierto número de soluciones mediante procesos idénticos a los de selección (proceso de regeneración).

El esquema general de operación se detalla a continuación:

- Generar aleatoriamente una población o conjunto de soluciones de un problema.
- Evaluar cada una de las soluciones por medio de la función *fitness*.
- Escoger de la población de soluciones un subconjunto que tenga un valor mayor de la función *fitness*.
- Mutar (cambiar) y entrecruzar (combinar) las diferentes soluciones de esa parte escogida, para reconstruir la población.
- Repetir un número máximo de iteraciones o hasta que se cumpla la convergencia a un valor fijado.

### 2.4.5.3 Búsqueda Tabú

El algoritmo de Búsqueda Tabú o *Tabu Search* (TS) ideado por Glover (1986) es un procedimiento iterativo de búsqueda y exploración en el dominio de soluciones que trata de evitar los óptimos locales y el comportamiento cíclico del algoritmo mediante la prohibición de unos movimientos de la solución actual (considerados tabú) y una estructuración de la memoria de soluciones pasadas.

El método de TS es inicialmente determinista, ya que no existe un criterio probabilístico de aceptación de la solución. Éste se basa en sustituir la solución generada o modificada sin ninguna condición de coste, es decir, tanto si es mejor que la solución en curso como si no. Esta única condición podría presentar el inconveniente de que aparezca como solución en curso una configuración que lo haya sido en una iteración anterior y que, por lo tanto, el algoritmo tenga un

comportamiento cíclico. Para evitar este fenómeno, se realiza una lista de soluciones o atributos de solución prohibidos o tabús. Esto es, se define un vecindario (conjunto de soluciones derivadas de la aplicación de un movimiento a la solución actual) constituido exclusivamente por soluciones que no contengan atributos "tabús". Sin embargo, en algunos casos se puede aceptar una solución con elementos tabús siempre que ésta sea la solución de mínimo coste durante el proceso de búsqueda (criterio de aspiración). La lista tabú no es estática, ya que los movimientos incluidos únicamente mantienen la prohibición durante un número de iteraciones acotado (memoria a corto plazo).

Según Glover y Laguna (2002) el método de TS se basa en tres aspectos fundamentales:

- El uso de estructuras flexibles de memoria basadas en atributos para una mejor explotación y evaluación de los dominios de soluciones.
- Mecanismos de control de las estructuras de memoria basado en la interacción entre las condiciones que limitan y hacen más flexible el proceso de búsqueda.
- La incorporación de memorias de diferente duración (de corto a largo plazo), para implementar estrategias que intensifiquen y diversifiquen la búsqueda.

El método de TS integra los conceptos de intensificación y diversificación en la memoria a largo plazo. El primero consiste en intensificar la búsqueda a partir de soluciones con determinadas características o que hayan demostrado (históricamente) ser buenas, y el segundo, interesa si el algoritmo se estanca en un cierto tipo de soluciones que se repiten con mucha frecuencia en la solución actual. Este algoritmo, al igual que el SA, no tiene una condición intrínseca de finalización, por lo tanto, se ha de definir una como por ejemplo, alcanzar un cierto número de iteraciones o el hecho de no progresar.

En Glover y Laguna (2002) se sugiere como nombre alternativo al TS el de algoritmo de "inhibición débil", ya que los movimientos tabús son generalmente una pequeña fracción del total de movimientos disponibles y tienen un período de afectación relativamente corto. En este sentido, este método puede contrastarse con la técnica del *branch and bound* que también prohíbe ciertos movimientos para evitar ciclos, pero lo hace de una manera más rígida, por lo que se le considera como una forma de búsqueda con "inhibición fuerte".

En Abdinnour-Helm y Venkataramanan (1995) y en Abdinnour-Helm y Venkataramanan (1996) se proponen dos métodos basados en los metaheurísticos GA y TS para solucionar el problema de localización de *hubs* sin restricciones de capacidad y con asignación simple y única de cada cliente a su *hub* asociado. El modelo definido en la siguiente ecuación parte de la ecuación de costes de O'Kelly (1992) donde el número de *hubs* es una variable de decisión y el coste fijo de establecer un *hub* se incluye en la formulación.

$$\min \sum_i \sum_k X_{ik} c_{ik} (O_i + D_i) + \sum_j \sum_m X_{jm} \sum_i \sum_k X_{ik} (\alpha T_{ij} c_{km}) + \sum_j X_{jj} f_j$$

sujeto a

$$X_{jj} - \sum_i X_{ij} \geq 0 \quad \forall j$$

$$\sum_j X_{ij} = 1 \quad \forall i$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j$$

La variable de decisión  $X_{ik}$  determina que el nodo  $i$  es asignado al *hub*  $k$  cuando  $X_{ik} = 1$ , mientras que en caso contrario  $X_{ik} = 0$ , de la misma forma que si  $j$  es un nodo terminal *hub*  $X_{jj} = 1$ . Las variables  $T_{ij}$  y  $c_{ij}$  representan respectivamente el flujo entre las terminales  $(i, j)$  y el coste por unidad de mercancía entre  $(i, j)$ , mientras que  $f_i$  representa el coste fijo de instalación si el nodo terminal  $i$  es un *hub*.

#### 2.4.5.4 Colonia de hormigas (ACO)

Los algoritmos ACO (*Ant Colony Optimization*) son modelos que reproducen el comportamiento de colonias de hormigas en la naturaleza. La capacidad de transmitirse información entre la colonia por medio de un rastro de feromona en su camino de ida y vuelta hacia un destino, les permite determinar la ruta más corta. En una etapa inicial, las rutas de hormigas entre dos puntos pueden generarse de forma aleatoria, pero cuando el sistema ha superado un tiempo necesario, la mayor concentración de feromonas se encontrará en el camino de menor longitud y podrá guiar a la colonia en su búsqueda de minimización de la distancia recorrida. La operativa irá marcando con más claridad (concentración) la ruta de menor coste a medida que el tiempo o iteraciones se incrementen.

En definitiva, la probabilidad con la que una hormiga escoge un camino aumenta con el número de hormigas que previamente hayan elegido el mismo camino, aunque la feromona también se va evaporando con el paso del tiempo provocando que el rastro sufra cierto debilitamiento.

La base de la modelización de rutas de distribución con la aplicación de ACO se puede ver en Dorigo et al. (1996). Se caracteriza por ser un proceso iterativo en que se introduce una colonia de  $m$  hormigas en cada iteración que construye una solución al problema. En cada iteración, las soluciones construidas por cada hormiga se basan en criterios probabilísticos en función de la concentración de feromona artificial y una información inicial (solución de partida). Cuando todas las hormigas han construido una solución se debe actualizar la feromona en cada arco y tras ésta, puede comenzarse una nueva iteración.

En Barcos (2002) se aborda el problema del transporte de muchos orígenes a muchos destinos con varios *hubs* con estrategias de envío directo, a través de uno o dos *hubs*, mediante una ruta con paradas múltiples en origen (*peddling en origen*), y mediante una ruta con paradas múltiples en destino (*peddling en destino*). Los resultados obtenidos han sido contrastados, para pequeños ejemplos, con los resultados exactos encontrados utilizando la programación entera. Finalmente, se aplica el algoritmo a una empresa que ofrece servicio de entrega en 24h en España peninsular y Baleares. La solución aportada por el heurístico (338,12m€) genera un coste por unidad de carga transportada un 8,1% inferior al coste actual de la empresa (368,06m€). Se ha comprobado adicionalmente que los costes son muy sensibles a los datos temporales y del nivel de servicio como son la velocidad de recorrido, el margen de tiempo de servicio o el tiempo de organización de la carga en terminales.

#### **2.4.6 Metodologías integradas de planificación de envíos en red troncal y red capilar**

En Wasner y Zäpfel (2004) se propone un método para la localización generalizada de *hubs* conjuntamente con un modelo de rutas de vehículos en la red capilar para la distribución de mercancías aplicado en Austria. En particular, el documento define la configuración de una red de distribución que gestione el número, la localización, las áreas de servicio y las rutas desde los clientes o puntos de servicio hasta los almacenes y viceversa.

El artículo expone que los principales análisis científicos sobre la localización de *hubs* se han basado en el problema de transporte de larga distancia directo entre un punto de visita y el *hub* asociado (O'Kelly 1986, Kliencewicz 1991, O'Kelly and Millar 1994, Ernst and Krishnamoorthy 1998, Ebery *et al.* 2000). Sin embargo, estos modelos propuestos no incorporan la visión de reparto del problema, en especial la fase de diseño de la recogida y reparto a los puntos de servicio de forma coordinada. Los modelos de localización de *hubs* suponen que la unidad de envío desde un *hub* a un cliente es independiente de la ruta escogida para visitar el cliente; de modo que los costes de entrega únicamente dependen de la suma del producto de los costes de envío desde el *hub* al cliente y el número de unidades repartidas al cliente.

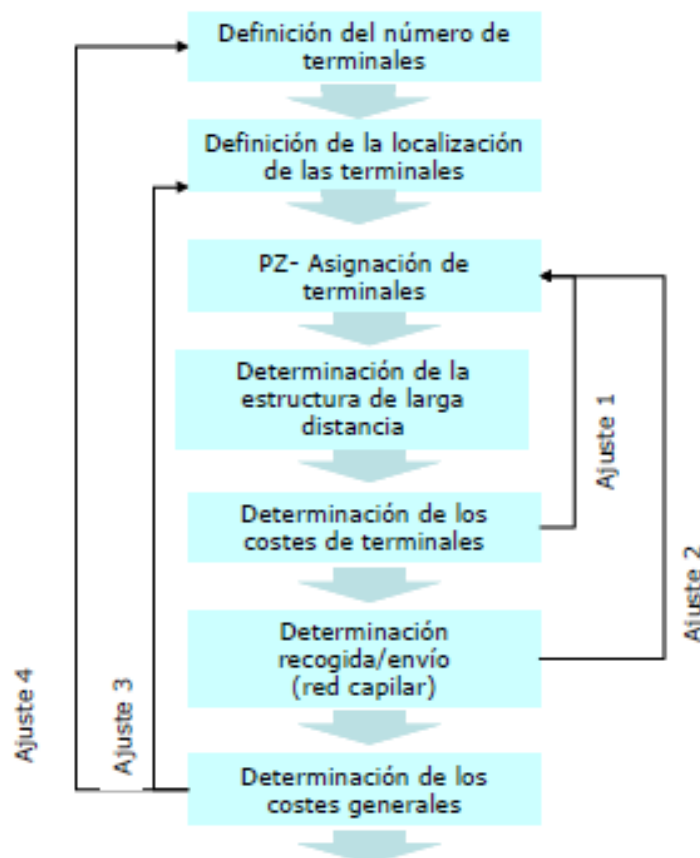
No obstante, los costes de entrega de los clientes para sistemas con vehículos con carga menor a la capacidad (*LTL*) dependen de la ruta de entrega de los vehículos. Por lo tanto, es necesario integrar en los modelos de localización el problema de diseño de rutas reparto y recogida para proponer una red de distribución física que integre los costes del envío directo al *hub* (*linehaul*), considerando a la vez los costes de reparto y recogida, costes de terminal y de terminal *hub*. Los costes de larga distancia (*linehaul*) ocurrirían entre *hubs*, entre terminales o entre *hubs* y terminales, mientras que los costes de recogida y entrega ocurrirían entre puntos de servicio (clientes) y terminales.

Debido a la capacidad de empaquetamiento de los flujos correspondientes a una zona de transporte dada, así como a la posibilidad de la utilización de vehículos de mayor carga, los costes de envío entre puntos de servicio y *hubs* (*line-haul*) son inferiores a los costes de entrega y reparto. Este hecho se manifiesta en Salhi and Rand (1989), artículo en el que se recogen las siguientes representaciones de costes:

- ✓ Costes de *line-haul* 15 – 25%
- ✓ Costes de entrega y recogida 35 – 60%
- ✓ Costes de operación en terminales y *hubs* 25 – 45%

De este modo, queda patente la necesidad de tener en cuenta de forma simultánea y coordinada la consideración del problema de localización de *hubs* y terminales con el de rutas de reparto o entrega.

En primer lugar se fija el número de almacenes y posteriormente su localización, de forma que posteriormente se determina la estructura de transporte a larga distancia. Si no se dispone de información aproximada acerca del valor óptimo del número de almacenes, es necesaria una fase de inicialización para determinar su convergencia a un valor.



El procedimiento de resolución de la Figura anterior se repite con distintos valores de número de almacenes (4, 10, 40, por ejemplo) y se determina el coste total del sistema. La idea que debe prevalecer es que el coste total del sistema sigue una función de costes convexa que depende del número de almacenes,  $N_T$ . Una vez se

haya identificado el valor subóptimo (por ejemplo 10) se repite el proceso para un intervalo más restringido de  $N_T$  (valores 6, 10, 15) para determinar la configuración total de costes, con lo que se termina la fase de inicialización. La determinación de las localizaciones de los almacenes se realiza especialmente durante la inicialización, de forma que cada zona postal de servicio puede tener localizada un almacén. Debido que el número de almacenes está fijado, los costes fijos de todas las localizaciones pueden considerarse constantes.

A partir de un método aproximado, las zonas postales donde se localizarán los almacenes serán determinadas. Los métodos disponibles son un algoritmo de *Añadida*, en el que se parte de 0 localizaciones y se identifica la localización que reduce al máximo la función objetivo, y el algoritmo de *Supresión*, en el que empezando con todas las localizaciones, en cada iteración se selecciona el almacén cuya eliminación comporta un incremento menor en la función objetivo.

Las nuevas localizaciones de los almacenes se pueden determinar alternativamente de tres formas diferentes:

1. Localizaciones completamente nuevas, independientes de las localizaciones previas.
2. Movimiento de un solo almacén, manteniendo la localización de los demás.
3. Se mueven simultáneamente múltiples localizaciones de almacenes.

La estructura de larga distancia se desarrolla en tres etapas:

- **Asignación de almacenes.** Se tiene en cuenta la distancia y el tiempo entre la zona postal y la localización de almacenes, hecho que puede comportar soluciones sustancialmente diferentes según el criterio sea distancia o tiempo. Se asignan probabilidades a cada zona postal (dependiente de la distancia) para realizar diferentes asignaciones en las etapas de iteración.
- **Determinación de la estructura de larga distancia.** La decisión recae únicamente en la definición de la red óptima que determine la localización de *hubs*, su número total y tipo de envío (directo o con transferencia) entre pares de almacenes, ya que el volumen total de mercancía a transportar queda fijado por las fases anteriores. Sin embargo, una solución exacta a este tipo de problemas en condiciones reales parece improbable y, por tanto, se deben realizar simplificaciones.
- **Determinación de los costes de almacenes.** La asignación de las zonas postales a los almacenes determina el volumen total de tráfico a ser transferido en los almacenes individuales, de forma que los costes pueden ser calculados directamente de las funciones de costes modeladas por el autor. Se realiza un estudio particular de reasignación de almacenes especialmente en las zonas postales de recogida que están en la frontera del área asignada a un almacén.

La siguiente fase es la definición de los transportes de reparto y recogida, que al depender de las asignaciones de almacenes se permite un segundo *feedback* para minimizar el coste total de los transportes de larga distancia, de reparto y recogida.



En esta fase, la solución del problema se puede realizar con la aplicación de alguna técnica heurística de la extensa bibliografía y producción científica sobre el tema.

Después de la primera iteración los costes son computados en la solución actual en el paso *Determinación de los costes totales*, de modo que se determina una primera solución para posteriores iteraciones.

Este método se ha aplicado para la re-planificación de una compañía de transporte en Austria con 10 almacenes y 1 *hub*. Los resultados derivados del estudio han logrado reducir los costes de distribución en un 15% con la aplicación de esta metodología.

### 3. Cross Docking - Estrategia logística en España. Algunos ejemplos

#### 3.1 Plan de Estrategia Logística

La Logística en España es un tema muy importante. El peso de la logística representa el 2,9% del PIB según el Observatorio del Transporte y la Logística en España de 2016, el Valor Añadido Bruto del sector Transporte y Almacenamiento creció más de un 5% en 2015 y un 4,9% en 2016, y dan empleo a más de 900.000 personas. Es por ello que el Ministerio de Fomento estableció el 25 de Noviembre de 2013 una **Estrategia Logística** para optimizar el transporte de mercancías y aumentar la competitividad de la industria.

Según la Nota de Prensa emitida desde la Oficina de Información de dicho Ministerio en esa fecha, el plan busca potenciar el papel de España como puerta de entrada, centro de tratamiento y distribución de mercancías intercontinentales para Europa, con una inversión estimada de 8.000 millones de euros.

El plan incluye un total de 18 propuestas de actuación, entre las que destaca la creación de la Ley del Sector Logístico, la elaboración de un Código de Buenas Prácticas y la puesta en servicio de autopistas ferroviarias, además de crearse una ventanilla única para la tramitación administrativa que aligere y homogenice los trámites en los diferentes modos.

El Plan de Estrategia Logística nacional fue presentado en Cádiz el 25 de Noviembre de 2013 por la entonces Ministra de Fomento, Ana Pastor, y ha sido elaborado por el Ministerio de Fomento en coordinación con las Comunidades Autónomas y los representantes del sector, con el objetivo de aumentar la competitividad de la industria y de la economía española en su conjunto, a través del desarrollo de una red intermodal, de potenciar el papel de España como *hub* de mercancías y de reducir los costes logísticos, entre otras medidas.

Este plan quiere conseguir un sistema de transporte multimodal, seguro, eficiente y sostenible, que conecte carreteras, ferrocarriles, puertos y aeropuertos; que optimice el funcionamiento de las cadenas de transporte y que dé respuesta a las necesidades de las empresas. Además, persigue potenciar el papel de España como puerta de entrada, centro de tratamiento y distribución de mercancías intercontinentales para Europa.

Prueba del papel que desempeñan las actividades logísticas y de transporte de mercancías, la Comisión Europea, en su Libro Blanco del Transporte de 2011, prevé que este sector crezca un 80 por ciento hasta 2050. Esto pone de manifiesto que la optimización del sector logístico ocupa un lugar muy destacado en la agenda política europea.

La Estrategia Logística se fundamenta en el Plan de Infraestructuras, Transporte y Vivienda (PITVI) y recoge 66 medidas, entre las que destacan **18 actuaciones prioritarias**, que serán las siguientes:

1. El fortalecimiento de la Unidad Logística, reforzando su composición y definiendo sus funciones para la implementación de la estrategia. La Unidad Logística, que se creó a comienzos de 2013, continuará siendo la encargada de mantener la coordinación y colaboración entre distintos actores implicados en la Estrategia, y de manera especial con los dos grupos ya constituidos con motivo de su elaboración: el grupo de comunidades autónomas y el Foro Logístico, formado por las asociaciones del sector.
2. El desarrollo de la Ley del Sector Logístico, una normativa específica de la logística, que dote al sector de un cuerpo jurídico propio.
3. El impulso a la liberalización del transporte ferroviario de mercancías, en la que ya se están dando pasos significativos.
4. La mejora de la formación del sector en coordinación con los Ministerios de Educación y de Empleo, y con las comunidades autónomas.
5. La elaboración de un código de buenas prácticas para dotar al sector de una mayor confianza y transparencia.
6. La creación de una ventanilla única para la tramitación administrativa que aligere y homogenice los trámites en los diferentes modos. El objetivo de esta actuación es armonizar la documentación requerida en las cadenas de transporte nacional e internacional, tanto para diferentes modos como servicios administrativos.
7. La integración de la Logística en el Observatorio del Transporte, para que integre y analice todos los datos del sector. El Observatorio pasará a denominarse del Transporte y la Logística.
8. Análisis de las capacidades de carga en el transporte por carretera.
9. La coordinación de calendarios de restricciones al transporte de mercancías por carretera, que armonice la heterogénea situación actual.
10. La puesta en servicio de Autopistas Ferroviarias, previo análisis de los potenciales tanto nacionales como internacionales.

11. La optimización de los modelos de gestión de terminales intermodales, que redunde en una mayor eficiencia y competitividad de los mismos.
12. El establecimiento de acuerdos con los sectores logístico e industrial para potenciar el uso del ferrocarril.
13. El incremento de la competitividad en los puertos, mediante decisiones como la reducción de tasas que está contemplada en el Proyecto de Ley de Presupuestos que se tramita en el Parlamento.
14. El análisis de la puesta en servicio de nuevas Autopistas del Mar, impulsando los correspondientes acuerdos con los respectivos países de la Unión.
15. Completar la definición del mapa logístico de España.
16. La adaptación de los principales corredores ferroviarios para transporte de mercancías, buscando una participación más activa del ferrocarril en la cadena de transporte, tanto de nivel nacional como internacional.
17. La mejora de los accesos terrestres a los puertos, como nodos básicos de conexión multimodal.
18. Y, por último, la conexión de forma directa de los puertos con terminales interiores, mejorando de la conectividad con su hinterland.

Tres años y medio después de su aprobación, el grado de avance en la actualidad de cada una de las prioridades es el siguiente:

- 1º. **Fortalecer la Unidad Logística de Fomento:** Medida materializada. La Unidad Logística es una unidad funcional no orgánica. Depende del Secretario de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda, coordinada por la Subdirección General de Planificación de Infraestructuras y Transporte.
- 2º. **Ley del Sector Logístico:** Se descarta y se reorienta la medida a la inclusión de elementos logísticos en otras leyes. Así, la Ley 9/2013 de Ordenación del Transporte Terrestre (LOTT) y el borrador de su Reglamento de desarrollo recoge a los operadores logísticos y los centros de transporte y logísticos; la Ley 38/2015 del Sector Ferroviario incluye las instalaciones de servicio, así como la regulación de los servicios complementarios y auxiliares; y la Ley 37/2015 de Carreteras considera como "itinerario de interés general" todo aquel que constituya el acceso principal a un puerto, aeropuerto o centro de transporte de interés general.
- 3º. **Materializar la liberalización del transporte ferroviario de mercancías:** Se aprueba la Ley del Sector Ferroviario y se divide Renfe en cuatro sociedades.
- 4º. **Desarrollar un sistema de formación para el sector:** Se encuentra en proceso de diagnóstico. Se detecta que existe una formación profesional suficiente, mientras que en la formación universitaria hay una mayor presencia en los distintos posgrados universitarios que en titulaciones de Grado.
- 5º. **Crear un Código de Buenas Prácticas:** El Código se estructura en tres bloques (económico, social y medioambiental). Se ha generado un

mecanismo de adhesión y los procesos de control del cumplimiento a través de indicadores, pero no se ha informado de las adhesiones al mismo.

- 6º. Implantar la Ventanilla Única:** Se basa en la nueva Ventanilla Única Portuaria DUEPort implantada como proyecto piloto en algunos puertos, y se ha presentado la propuesta de desarrollo de la necesaria Plataforma Tecnológica, dentro del proyecto llamado PEGASUS (proyecto de integración de la cadena logística) en la convocatoria CEF (Conectar Europa) 2016 lanzada por la Comisión Europea. El objetivo principal de dicho programa CEF es acelerar y apoyar las inversiones en el área de las redes trans-europeas de transporte, energía y telecomunicaciones.

Por su parte, el sistema DUEPort permite agilizar la gestión de escalas, anticipar el movimiento de mercancías y el tránsito de pasajeros, mejorando la competitividad de la red logística portuaria española, y da respuesta a la normativa europea que exige que todos los Estados miembros cuenten con sistemas que permitan realizar estas gestiones portuarias telemáticamente. De esta forma, la información llega a Puertos del Estado desde donde el propio sistema DUEPort automatiza los flujos de trabajo y se encarga de dirigirla a los órganos que corresponda para completar los requisitos operativo y legales, como son Aduanas, Guardia Civil, Policía Nacional, Armada Española, Sanidad Exterior, Marina Mercante, etc. Las navieras critican la disparidad de ventanillas únicas existentes.

- 7º. Crear el Observatorio del Transporte y la Logística (OTLE):** Medida materializada. Han sido añadidos nuevos indicadores de logística al antiguo Observatorio del Transporte. Se reelabora, presenta y publica un informe cada año en el que se hace un balance general de diversos aspectos relacionados con el transporte y se profundiza en alguno de ellos de forma monográfica. En Marzo de 2017 se presenta la cuarta edición del mismo correspondiente al año 2016. Se estructura en torno a 5 bloques principales: Base de Datos, Indicadores, Informe, Página web y Jornadas. En esta edición se profundiza en la seguridad y el medioambiente, dos ámbitos esenciales del transporte. Para facilitar la consulta y la interpretación por cada usuario de los contenidos, éstos se ordenan de acuerdo con 5 bloques temáticos (movilidad, competitividad, seguridad, sostenibilidad ambiental, y logística). En cuanto a la *evolución general de la movilidad y el ciclo económico*, el aspecto más destacado de 2015 es la consolidación del crecimiento en todas las magnitudes de la movilidad. Numerosos estudios han mostrado que el transporte es un indicador de actividad muy pro-cíclico, es decir, en períodos de recesión económica desciende con mayor fuerza que el PIB y en períodos de crecimiento presenta tasas de crecimiento superiores al PIB. Se están recuperando los tráficos perdidos con la crisis, pero sería deseable que se tradujera en una generación de valor añadido.

En lo que respecta al análisis por modos, el total de vehículos-km aumentó en 2015 más que en 2014, además de mejorar la eficiencia de la circulación por carretera (uso de vías más rápidas y seguras). Los aumentos se producen en todos los modos de transporte (carretera, ferrocarril, aéreo y

marítimo). En cuanto al reparto modal, la carretera sigue siendo el modo predominante en el ámbito nacional, especialmente en mercancías. Para el transporte internacional, el modo marítimo es el predominante para mercancías, y el aéreo para el transporte de viajeros.

Si hablamos de la *competitividad*, el año 2015 fue igualmente un año de crecimiento del transporte en cuanto a las principales magnitudes económicas. Los datos de sus dos principales subsectores para el año 2014 (último disponible) muestran un comportamiento desigual. El Transporte Terrestre y por Tubería creció bastante menos que el Almacenamiento y Actividades Anexas., sucediendo lo mismo en términos de productividad del trabajo. Es destacable el hecho de que la inversión pública en infraestructuras y servicios de transporte realizada por el Ministerio de Fomento disminuyó en 2015 un 7,9% respecto al año 2014. La tónica general de los precios y costes en el año 2015 estuvo muy condicionada por la caída del precio del petróleo. El transporte aéreo es el que más redujo el precio, mientras que los transporte ferroviario y por carretera se incrementaron ligeramente.

En cuanto a la *seguridad*, el número de fallecidos y heridos hospitalizados en el transporte por carretera se mantuvo prácticamente estable. La accidentalidad aérea y ferroviaria también arroja datos positivos en los últimos años.

En relación a la *sostenibilidad*, el consumo de energía final procedente del transporte se ha reducido, debido a la caída de los tráficos. El modo más eficiente fue el ferroviario, seguido del modo por carretera y, por último, el modo aéreo. También se ha producido una reducción progresiva de las emisiones totales de gases de efecto invernadero, así como de la intensidad de las emisiones por unidad de tráfico.

Por último, el peso económico del sector de la *logística* ha sufrido un cambio estructural importante. Las actividades directamente vinculadas con el transporte han experimentado un descenso, mientras que el subsector del Almacenamiento y Actividades Anexas es el que mayor contribución aporta al crecimiento del sector. Las superficies de nodos logísticos se mantienen estables porque la dotación agregada de instalaciones es actualmente suficiente y se produce una moderación en la inversión. El transporte multimodal y el transporte intermodal crecieron durante el año 2015, aunque en menor medida que el transporte total.

- 8º. Analizar el aumento de pesos y dimensiones en camiones:** El análisis a realizar se vio afectado por la negociación del cambio propuesto por la Dirección General de Tráfico de reforma normativa sobre la masa máxima de los camiones, que finalmente se ha aprobado sólo para el uso de vehículos de 60 toneladas y 25,25 metros sujetos a la autorización especial, llamados popularmente megatrailer o megacamiones. Fomento descarta las 44 toneladas y ampliar a 4,5 metros la altura del camión.
- 9º. Homogeneizar las restricciones al tráfico de camiones:** No se han producido logros ni avances en esta materia, que tiene difícil solución por el

problema competencial de fondo y unas diferencias de criterio importantes entre Estado Y comunidades Autónomas.

- 10º. Puesta en marcha de autopistas ferroviarias:** Se ha identificado un posible corredor nacional (Madrid-Barcelona) y dos internacionales (Barcelona-Betembourg y Vitoria-Dourges), pero no se ha implementado ninguno. El 9 de octubre de 2015 se constituyó un grupo de trabajo hispano-francés en esta materia.



El 71% de las exportaciones de España se produce en estos dos corredores, y no existe ninguna línea de tren que los recorra, porque no pasa por Madrid.

- 11º. Optimizar el modelo de gestión de las terminales intermodales:** Se ha elaborado el modelo de ordenación y explotación de las terminales intermodales y logísticas (TILOS). El modelo por el que apuesta la Unidad Logística está basado en el llamado *land-lord* usado en los puertos españoles, que supone la división entre la propiedad y la gestión. El modelo *landlord* es aquel en el que la Autoridad Portuaria se limita a ser proveedor de infraestructura y suelo portuario y a regular la utilización de este dominio público, mientras que los servicios son prestados fundamentalmente por operadores privados en régimen de autorización o concesión.
- 12º. Acuerdos con el sector logístico e industrial para impulsar el ferrocarril:** Se han firmado acuerdos con el sector del gran consumo, automóvil, químico y siderometalúrgico, con escasa implantación de los mismos. Se ha realizado un acuerdo piloto con el análisis de actuaciones en la línea Valladolid (RENAULT) - Puerto de Santander.
- 13º. Mejora de la relación calidad-precio de la oferta portuaria:** La reducción de tasas y la ampliación de las bonificaciones en 2013 se ha mantenido hasta la fecha. Se ha efectuado la mejora del marco jurídico para permitir a las autoridades portuarias, en el marco de su régimen de autonomía, el establecimiento de bonificaciones en las tasas portuarias. Además, se ha aprobado la ampliación de los plazos concesionales de los contratos, pero sin materializar en la mayoría de expedientes.
- 14º. Potenciar las Autopistas del Mar:** Puesta en marcha de la Autopista del Mar de Vigo, denominada Autopista del Mar Atlántica Algeciras/Vigo - Nantes/Le Havre, de la que está funcionando el servicio entre Vigo y Nantes.



La Autopista Gijón-Nantes interrumpió su servicio desde 2015 por inviabilidad económica, y se encuentra en proceso de reactivación.

- 15º. Impulso de terminales logísticas estratégicas y prioritarias:** Se han definido criterios para la categorización de las terminales por flujos e instalaciones. La subdirección de normativa propone incluirlos en el ROTT (Reglamento de Ordenación de los Transportes Terrestres). Se han firmado acuerdos para priorizar las terminales prioritarias y estratégicas con algunas comunidades como Madrid, Cataluña y Valencia. No existe un mapa logístico definido, y se ha abandonado el objetivo de completarlo por su difícil solución debido al problema competencial de fondo y unas diferencias de criterio importantes entre Estado y Comunidades Autónomas.
- 16º. Adaptar los principales ejes ferroviarios a los estándares internacionales:** Los principales avances se centran en el Corredor Mediterráneo, ya que en la convocatoria CEF ya resuelta se ha concedido ayuda al proyecto de Adif para abordar la fase 1 de dicho corredor, sección Valencia-Tarragona-Barcelona, para la implementación del ancho UIC (ancho de vía estándar o internacional utilizado en las líneas de alta velocidad -1.435 mm-).
- 17º. Mejorar los accesos terrestres a los principales puertos:** Se ha creado el Fondo Financiero de Accesibilidad Terrestre Portuaria para accesos, apartaderos, banalizaciones, etc. Se han tomado acuerdos para desarrollar los nuevos accesos de los puertos de Barcelona (acceso viario y ferroviario sur), Cartagena (acceso ferroviario a la Dársena de Escombreras) y Gijón (accesos viarios), pero ninguno se ha materializado.
- 18º. Mejorar la conectividad de los puertos con su *hinterland*:** Se lleva a cabo a través de los planes de empresa de las Autoridades Portuarias. También se contempla con proyectos propuestos para obtener la ampliación de plazos concesionales. (*Hinterland* es la zona de influencia de un puerto, es decir, es el territorio que se comunica con un puerto importante que le sirve de vía comercial).

### 3.2 Análisis del contexto europeo

El **Plan de acción para la logística del transporte de mercancías** de 18 de octubre de 2007, recogido en la Comunicación de la Comisión 2007/607, es una de las diversas iniciativas políticas de la Comisión Europea para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad del transporte de mercancías en la Unión Europea. Propone una serie de acciones con objeto de crear un marco adecuado para reforzar la cooperación y la coordinación entre las diferentes dimensiones de la política de transporte.

Las acciones propuestas en dicho Plan comprenden la implantación de sistemas de transporte inteligente (STI), la supervisión de la eficiencia en el transporte de mercancías, la simplificación de las cadenas de transporte, la homogeneización de las normas relativas al peso y las dimensiones de los vehículos en la UE, el impulso de los



corredores verdes dentro de la Red Transeuropea de Transporte y una mayor integración entre la logística del transporte urbano e interurbano.

El 29 de noviembre de 2012, la Comisión Europea publicó el **Libro Verde sobre un mercado integrado de los servicios de entrega para impulsar el comercio electrónico en la UE**. En este libro se analiza la situación actual de los mercados de comercio electrónico y de los servicios de entrega en Europa y se estudian los requisitos para la creación de un mercado único de entrega. Así mismo, se examinan los principales desafíos de las distintas partes y se resaltan las oportunidades de mejorar el proceso de entrega en beneficio de ciudadanos y empresas, en particular de las pequeñas y medianas empresas (PYMES).

Del seno del Parlamento Europeo y del Consejo en 2003 surgió el **programa Marco Polo** con el objetivo de reducir la congestión de las infraestructuras viarias y mejorar el impacto medioambiental del sistema de transporte, mediante el trasvase de una parte de las operaciones de transporte de mercancías por carretera al transporte marítimo de corta distancia, al ferrocarril y a las vías navegables interiores.

El primer programa Marco Polo de la Comunidad Europea, con un presupuesto de 115 millones de euros, entró en vigor en 2003 y se concluyó en 2006. Era continuación del programa PACT (*Pilot Actions for Combine Transport*) que finalizó en 2001 y seguía la línea de las principales conclusiones del Libro Blanco de la Comisión Europea de 2001.

El programa Marco Polo II para el periodo 2007-2013 incluyó nuevas disposiciones, contó con un presupuesto mayor (450 millones de €) y una cobertura geográfica más amplia. Se aplicó a las acciones que afectaban al territorio de al menos dos Estados miembros o al territorio de al menos un Estado miembro y el de un tercer país próximo.

España cuenta con unas magníficas condiciones para convertirse en un gran nodo logístico europeo. En efecto, si bien se sitúa en la periferia del continente, su privilegiada ubicación geográfica, tanto a nivel continental como insular, la convierte en una **puerta de entrada idónea hacia Europa** de las mercancías provenientes tanto del Norte de África como de América o Asia.

Además de esta excelente ubicación, España dispone de unas **infraestructuras de transporte de primer nivel** en todos los modos (carretera, ferrocarril, transporte marítimo y aéreo). Asimismo, la integración de buena parte de la red de transporte nacional en los **grandes corredores de mercancías europeos e internacionales**, facilitan y aseguran el transporte de las mercancías hacia el exterior.

España se ubica en una posición estratégica para poder aprovechar las grandes rutas marítimas de transporte de mercancías que dan la vuelta al mundo, las llamadas **rutas Round the World** que todas las navieras importantes (Maersk, MSC, CMA CGM, etc) ofrecen entre sus servicios.

El **Transporte Marítimo de Corta Distancia (TMCD)** o Short Sea Shipping consiste en el movimiento de mercancías y viajeros por mar entre puertos situados en

territorio de la Unión Europea o entre esos puertos y puertos situados en países no europeos con una línea de costa en los mares que rodean Europa. La posición geográfica de España, con numerosos puertos tanto en la fachada atlántica como mediterránea, permiten conexiones con números países de su entorno que aportan gran eficiencia a los flujos de mercancías.

Los principales países de destino del TMCD de carga rodada (Ro-Ro y Ro-Pax) de España son el Reino Unido, Marruecos y Argelia, con más de 10 líneas. Los principales puertos de destino del TMCD español son Tánger Med, Casablanca y Civitavecchia. En cuanto al TMCD de contenedores, destacan las más de 20 líneas de España con Italia, así como las más de 15 existentes con Marruecos y Francia. Los principales destinos de las líneas de TMCD españolas de contenedores son Felixstowe, Génova, Róterdam y Casablanca.

Según el Observatorio Estadístico del Transporte Marítimo de Corta Distancia en España, existen dos tipos especiales de servicios de TMCD:

- *TMCD Alternativo a la Carretera*: en esta categoría se incluyen los servicios marítimos de contenedor o rodados en los que existe una alternativa de transporte terrestre. Se han excluido, por tanto, de dicha categoría los tráficos entre España y países o archipiélagos no accesibles por vía terrestre, así como los de graneles y vehículos.
- *Autopistas del Mar (AdM)*: servicios de TMCD Alternativos a la Carretera que cumplen ciertos criterios de selección, esto es, una frecuencia mínima de 3 salidas semanales y 3 escalas en diferentes puertos como máximo, y que son prestados en los corredores de Autopistas del Mar de la Red Transeuropea de Transporte en los que España está presente.

De este modo, las **Autopistas del Mar** son un subconjunto de los servicios de TMCD Alternativo a la Carretera y a su vez éstos son un subconjunto de los servicios totales de TCMCD.

La **Red Transeuropea de Transporte** (Trans-European Transport Network) es un conjunto planificado de redes prioritarias de transporte concebidas para facilitar la comunicación de personas y mercancías a través de la Unión Europea. A lo largo del territorio español discurren varios corredores que se engloban dentro de esta red de transporte internacional, tanto por ferrocarril como por carretera. Además, en España están planificados otros corredores a nivel europeo diseñados para optimizar la eficiencia medioambiental (proyecto SuperGreen de la Comisión Europea) y la logística de mercancías (red EuroCarex).

Por todo ello, si el sector logístico español consigue aprovechar todas estas ventajas puede convertir al país en la **gran Plataforma Logística del Sur de Europa** y en punto de concentración y manipulación de los tráficos internacionales de mercancías, llevando a cabo las actividades logísticas principales y otras de importante valor añadido tales como etiquetado, embalaje, consolidación y desconsolidación de carga, etc.

### 3.3 Algunos ejemplos de empresas que aplican Cross Docking

#### 3.3.1 Grupo Eroski

El Cross Docking se ha convertido en una solución logística para el Grupo Eroski que evita almacenar más de 20.000 artículos diferentes de 200 de sus proveedores de bazar. Desde hace unos años, el 35% de la mercancía que circula por su plataforma de distribución de Álava que abastece a los hipermercados del Grupo lo hace a través de esta fórmula.

Para alcanzar el equilibrio entre mejorar el servicio y reducir costes, se implementa la estrategia de Cross Docking en el flujo logístico del centro de almacenaje y distribución a los hipermercados Eroski, ubicado en Agurain (Álava).

La situación logística no alimentaria en el Grupo Eroski en 1994 era la siguiente: un 20% de los productos de bazar (menaje, hogar, automoción, juguete, ocio, etc.) eran de importación y estaban centralizado en varios almacenes, y el 80% de estos artículos eran enviados directamente a los hipermercados por parte de sus respectivos proveedores. Las tiendas eran las encargadas de realizar los pedidos de forma individual a cada proveedor. Por un lado, debido al tamaño más reducido de algunas de ellas (3.000 o 4.000 m<sup>2</sup> en comparación con los hipermercados convencionales de unos 12.000 m<sup>2</sup>), se encontraban con que no podían comercializar las gamas completas de ciertos artículos porque no llegaban al pedido mínimo exigido por el suministrador. Cuando decidían comprar estas referencias, un gran volumen de ellas se quedaba en el interior de sus almacenes por falta de espacio en el lineal. Además, al no existir unos procesos de gestión preestablecidos de tales unidades, en ocasiones, ni siquiera se sacaban a la venta dichos excedentes.

Por otro lado, los proveedores a veces no entregaban las cantidades y unidades solicitadas por los puntos de venta en el plazo establecido y, si las enviaban, lo hacían a destiempo, con lo que no se podían organizar adecuadamente las ofertas y las campañas promocionales. Además, está el trabajo administrativo que requería para el personal de los hipermercados la gestión de todos los documentos que genera la realización de un pedido individual por cada proveedor.

Para solucionarlo, se plantearon varias alternativas. En primer lugar, una reingeniería de procesos con el fin de mejorar radicalmente el servicio de los proveedores, lo que sería muy difícil pero efectivo a medio y largo plazo y aumentaría la transparencia. En segundo lugar, reducir el mínimo de los pedidos, pero provocaría un incremento de los costes de transporte. En tercer lugar, se estudió la posibilidad de centralizar todo el stock en la plataforma logística, de forma que el servicio a las tiendas sería el óptimo y se reducirían los costes de los proveedores; pero, en contrapartida, subirían los gastos para Eroski por la necesidad de una nueva plataforma, altos stocks, más capacidad de transporte para hacer las entregas, etc.

La última alternativa que propuso el departamento de logística, y por la que definitivamente se apostó, fue la puesta en marcha de un nuevo sistema operativo que comprendía las ventajas de la centralización del producto en la plataforma sin

elevar el coste del almacenaje, el Cross Docking, a la que ellos llaman Grupaje, y que aporta una total visibilidad de la cadena desde el proveedor hasta la tienda.

Entre finales de 1996 y 1997 se puso en marcha un proyecto piloto a partir de dos hipermercados (uno grande y otro pequeño) y cuatro proveedores para luego extrapolarlo al resto de las partes involucradas. Actualmente, participan todos los puntos de venta y más de 200 suministradores de 20.000 artículos diferentes. El paso inicial fue que los hipermercados realizaran sus peticiones a cada suministrador un día concreto de la semana y de seis a diez de la mañana, cuando se reponían los lineales. La plataforma, por su parte, agrupaba todas las necesidades de las tiendas y enviaba un solo pedido al proveedor en ese día asignado, con lo que éste podía organizar sus recursos para preparar los envíos. Esta preparación, aunque con una única dirección de entrega, además de una fecha y hora concretas para su recepción, se componía de un bulto por cada hipermercado, de modo que en la plataforma de Eroski se redujo al máximo la manipulación.

La plataforma de Eroski, de 28.500 m<sup>2</sup> y situada en Agurain (Álava), tiene forma de "T". A un lado de su brazo más largo se encuentran los muelles de descarga para la recepción de la mercancía. Los palets que llegan pueden ser monorreferencia o multirreferencia para una sola tienda y, en este caso, se envían directamente a la playa correspondiente de tal hipermercado. Esta playa se encuentra junto a los muelles de carga de expediciones de Cross Docking, enfrente de los anteriores. Cuando se reciben palets multiclientes (para varias tiendas) se ha de hacer una pequeña manipulación en estanterías para su separación por direcciones de envío.

Un 80% de esta mercancía sale de las instalaciones el mismo día que entra porque pertenece a los grandes establecimientos con elevados volúmenes de movimiento. El restante 20% de la carga se expide al día siguiente, que es cuando normalmente se completa un camión para los hipermercados de menor tamaño.

Esta zona de Cross Docking tiene una superficie aproximada de 6.000 m<sup>2</sup> y encima se ha levantado una entreplanta para gestionar los productos textiles. El resto de la nave, el brazo corto de la "T", se ha destinado a almacenar aquellos artículos de importación que llegan normalmente en contenedores a través del puerto de Bilbao. Los operarios preparan los pedidos de las tiendas diariamente a partir de esta zona de almacenaje, que está organizada con estanterías de paletización convencional, y los consolidan con la mercancía que se mueve bajo la fórmula del Cross Docking. Los hipermercados, por tanto, reciben cada día el conjunto de estas solicitudes de bazar a través de un solo camión.

Los **hipermercados** comunican sus necesidades a la central mediante los códigos EAN 13 (unidad de producto), EAN 14 (agrupación o unidad de expedición) o EAN 128 (identifica la unidad, la agrupación, el lote, la caducidad, la fecha de fabricación, etc.). También utilizan el código de barras de la etiqueta del lineal. Para realizar los pedidos se teclean las referencias en el terminal. Pero lo más significativo es que se ha definido una asociación entre el día de la semana concreto y un proveedor determinado. Las **ventajas** que presenta para los hipermercados son:

- Realización del pedido mediante transmisión electrónica a la central.
- Plazo de entrega riguroso.
- Homogeneización del servicio para todos los hipermercados.
- Desaparición de la limitación del pedido mínimo y posibilidad de vender todas las referencias del catálogo.
- Gestión eficiente del lineal.
- Eliminación del stock de reserva.
- Reducción de los costes administrativos de la gestión de los pedidos.
- Disminución de los costes de recepción porque se recibe un único o únicos camiones al día.
- Interlocución con la plataforma exclusivamente y no con cada proveedor.

Los **proveedores** reciben el pedido de Eroski el mismo día de la semana y a la misma hora. Tal pedido es el sumatorio de todas las necesidades del conjunto de los hipermercados, lo que supone un albarán y una única factura. La entrega se realiza en una sola dirección, en la plataforma de Agurain, y en un plazo riguroso de tres días laborales, que siempre resulta ser el mismo día de la semana. Además, se prepara un bulto separado e identificado por cada punto de venta. Las **ventajas** para los proveedores son:

- Disminución de los costes de transporte (una sola entrega, en vez de una para cada hipermercado).
- Reducción de los costes administrativos, ya que ahora reciben un pedido semanal conjunto, lo que supone una sola factura y un albarán.
- Resolución rápida de litigios. Ahora, el interlocutor es la plataforma y antes debían mediar con cada tienda individualmente. Mejor planificación del servicio porque saben con antelación qué día llega el pedido y cuándo deben realizar la entrega en la plataforma.

En cuanto a la **plataforma**, la mercancía se recepciona en el día y a la hora fijadas previamente con el proveedor. Al llegar en bultos separados por direcciones finales de envío se simplifican las tareas de entrada y manipulación. A las 24 horas el hipermercado recibe la carga, si el Cross Docking se ha realizado el mismo día. Por tanto, el plazo de entrega total del ciclo completo es de cuatro días laborales, repitiéndose todas las semanas de forma regular. Las **ventajas** para la plataforma son:

- Aumento de la rotación de los stocks (un día de stock).
- Disminución de las tareas de manipulación ya que los pedidos para las tiendas son preparados por los proveedores.
- Organización óptima de los muelles de entrada y salida.
- Liberación de espacios para el almacenamiento y el picking de otras categorías, orígenes, flujos, ...

Actualmente, en la plataforma de Agurain, entre el 30 y el 35% de las unidades que circulan lo hacen a través de los flujos de Cross Docking. Se trata de artículos cuya

rotación suele ser de un día. La rotación del esto de mercancías (productos de importación, textiles, electrodomésticos, etc.) es de 13 o 14 días.

Al comprobar los buenos resultados de la utilización del Cross Docking para la distribución de muchas de las referencias, el departamento de logística decidió probar esta fórmula con otros artículos como los textiles. Con algunos de los proveedores de tales productos se aplica pero con condiciones especiales porque trabajan exclusivamente bajo pedido (los plazos de entrega oscilan entre una y cuatro semanas). De esta forma, se ha implantado la comercialización de nuevas gramas en los hipermercados. Sobre todo en los más pequeños que al igual que en el caso anterior no podían vender la totalidad del catálogo por no llegar al pedido mínimo. Además, se ha logrado un reaprovisionamiento continuo con pedidos semanales a la mayoría de los proveedores.

El área de electrodomésticos también ha sido motivo de cambio. "Cuando un cliente compra una lavadora normalmente es porque se le ha roto la antigua, con lo cual, necesita una nueva con urgencia. Se ha puesto en marcha una solución a unos flujos muy tensos realizando varios pedidos y entregas en la misma semana, con menores plazos de envío del proveedor a la plataforma y de ésta a los hipermercados. Otro aspecto es que algunos de los electrodomésticos como las secadoras o las neveras son enviados por el proveedor con urgencia directamente a casa del cliente.

Con los productos de alimentación también se ha empezado a trabajar con Cross Docking para las familias de media y baja rotación. Hasta el año 2000 por esta plataforma de Álava circulaban del 10 al 15% de las mercancías bajo esta fórmula, ahora el volumen alcanza al 35%. Como ya se ha dicho, 200 proveedores utilizan este método para enviar unos 20.000 productos distintos a los hipermercados. "Almacenar tal cantidad sería imposible por el tremendo coste que supondría sólo por la necesidad de superficie.

Actualmente, se están implantando otras mejoras, pero en este caso puramente tecnológicas. Se trata de la incorporación de mensajes EDI (intercambio electrónico de datos) para la comunicación entre la plataforma y los proveedores: ORDERS (pedidos a través de mensajes), DESADV (albaranes de entrega en la plataforma con información de faltas por tienda), RECADV (confirmación de entrega en plataforma) e INVOIC (facturación del proveedor). Todo ello junto con la recepción de la mercancía en el centro logístico mediante la codificación EAN 128.

De cara a un medio plazo "están estudiando la posibilidad de incorporar unas etiquetas más tecnológicas (las actuales sólo son informativas y no son legibles por un sistema automático), de forma que se pueda realizar una entrada automática en la plataforma para direccionar cada bulto a la playa del hipermercado que corresponda. Es decir, la idea es poner en marcha en los muelles de recepción distribuidores automáticos y *sorters* de clasificación para incrementar la productividad de la pequeña manipulación que se realiza hoy día. Con este sistema los proveedores no tendrían que preparar los pedidos por cada tienda, reduciéndose entonces los costes y el nivel de errores del picking manual.



### 3.3.2 Fnac

El grupo francés Fnac vende en España todo tipo de productos para disfrutar del tiempo libre. Cada una de las 27 tiendas distribuidas por el territorio español dispone de unas 100.000 referencias en discos, 150.000 en libros y una gama de 10.000 productos técnicos. Sin embargo, prácticamente carecen de stock. La provisión se hace diariamente empleando las técnicas del Cross Docking desde un único almacén situado en Madrid, donde los 400 proveedores nacionales envían sus productos.

Creada en 1954, hoy en día Fnac es la primera distribuidora en Europa de bienes culturales y de ocio. Dispone de establecimientos abiertos en todo el mundo (Francia, Mónaco, Bélgica, Portugal, Brasil, Italia, Suiza y Taiwán, además de en España). Próximamente, la compañía tiene previsto abrir nuevos centros en Francia, Portugal, Italia, Brasil y, quizás, en España, aunque cualquier detalle adicional al respecto es confidencial por su valor estratégico.

Con casi 3.000 millones de euros de facturación anual, de los cuales casi la décima parte corresponde a España— más de 14.000 trabajadores, 15 millones de clientes, un millón de socios y una superficie comercial superior a los 188.000 m<sup>2</sup>, Fnac se sitúa entre las cien primeras empresas francesas y las 500 primeras de Europa. Cada tienda dispone de unas 100.000 referencias en discos, 150.000 en libros aproximadamente y una gama de 10.000 productos técnicos con más de 5.000 paquetes de software.

Los puntos de venta que Fnac tiene en España se reparten geográficamente en Madrid, Valencia, Zaragoza, Alicante, Asturias, Bilbao, San Sebastián, Pamplona, Gerona, Barcelona, Granada, Málaga, Marbella, Sevilla, Murcia, La Coruña y Valladolid.

Los productos que los clientes españoles de Fnac adquieren son suministrados, en su gran mayoría, bien por empresas españolas bien por distribuidoras locales de fabricantes internacionales. En total, la red de suministro suma más de 400 proveedores.

Toda la mercancía ubicada en las tiendas españolas de Fnac pasa por el depósito central, y único, de la empresa, que se encuentra en Madrid. Este centro neurálgico de la logística tiene 4.500 m<sup>2</sup>. El objetivo es que cada producto esté almacenado el menor tiempo posible, siendo lo ideal que entre un día y salga a las pocas horas, es decir, se tiende al sistema de Cross Docking, lo que se consigue en un 80% de los casos. El resto son artículos técnicos en su mayoría y se mantienen almacenados por poco tiempo más.

En concreto, dependiendo de las unidades por referencia en stock y de su rotación, las mercancías se depositan en dos tipos de sistemas de almacenaje:

- En estanterías de paletización convencional con capacidad para 2.700 unidades y de cuatro a cinco niveles de carga.



- En simples para cargas ligeras de aproximadamente 2 m de altura, con unas 4.000 ubicaciones y seis niveles de carga.

El primero se utiliza cuando se trata de productos voluminosos, como televisores, ordenadores, cadenas de sonido, etc., o grandes cantidades de un sólo artículo, desde un libro que ha ganado un premio hasta el disco de mayores ventas de la temporada. En el segundo se almacenan artículos pequeños o que requieren pocas unidades (consumibles o cámaras de fotos de gran valor).

En lo que se refiere a la ubicación y la reposición en la zona de paletización, el proceso corre a cargo de operarios cuyo cometido es manejar las carretillas elevadoras. El picking se resuelve con recogepedidos, que acceden a los pallets del primer y segundo nivel de carga. Asimismo, se emplean pistolas de radiofrecuencia con terminales que dan las órdenes de los movimientos a realizar. Cada vez que el operario coge una referencia, la revalida y hace una lectura del pallet para informar de que ha terminado esa línea del pedido. En la zona de simples el funcionamiento es el mismo, aunque el empleado recorre los pasillos andando y confirma que ha concluido leyendo la posición. Estos sistemas de radiofrecuencia se emplean no sólo para el control de la calidad, tanto en el almacén, en la carga de los camiones, en los inventarios permanentes y en las devoluciones, sino en casi todos los procesos logísticos de las tiendas.

Como los puntos de venta de Fnac disponen de superficies de distinto tamaño, los pedidos se elaboran a partir de pallets completos, cajas o unidades de una sola referencia, que a su vez se introducen en cajas nuevas junto a otras distintas. Todos los artículos coinciden en la zona de expedición donde se consolidan los pedidos y se forman nuevas pallets que pasan a ser identificadas con una etiqueta y código. De esta forma, se consigue cumplir con la trazabilidad y tener localizada en todo momento la carga.

En este centro neurálgico también es necesario identificar con etiquetas cada artículo y asignarle el precio de venta al público. Cuando se trata de CD, DVD y cintas de video, tal función se resuelve con un autómata llamado *CD sorter*, capaz de recepcionar, etiquetar y repartir por tienda más de 6.000 productos a la hora con sólo tres personas. Por otra parte, existen otros 15 puestos semiautomáticos con una capacidad de tratamiento de 3.000 artículos al día cada uno. En ellos se manipulan los libros y software, cuyo tamaño y volumen es muy variado por lo que no se permite una automatización mayor. En concreto, el operario realiza la primera lectura del código del producto y lo introduce en cajas, pero un autómata se encarga de colocar la etiqueta con el precio y unas cintas de realizar el transporte. Al final de ambos procesos otro *sorter* clasifica las cajas en función del destino de cada una de ellas.

Cada día, se cargan en el almacén furgonetas y camiones de dos compañías externas que parten con destino a las tiendas. Cuando la mercancía llega al centro comercial, los encargados la colocan en las estanterías. Si hay algún tipo de campaña o evento y se calcula que un determinado producto tendrá más ventas de lo normal, se dejan ejemplares en un pequeño depósito habilitado en los establecimientos, siempre sin

superar el centenar de unidades totales almacenadas. Si se compara esta cifra con las cerca de 200.000 referencias disponibles en cada centro, se observa que el objetivo de la empresa es tener almacenado lo menos posible, intentando que el cliente siempre encuentre el producto que desee. En metros cuadrados, la relación vendría a ser de 2.000 de superficie de venta frente a 200 destinados a almacenamiento en tienda.

El sistema para el abastecimiento de productos a las tiendas está totalmente informatizado a través de un programa desarrollado por una empresa externa. Gracias a él, las tiendas se comunican con la central de compras y ésta con los proveedores, quedando constancia de la entrega y recepción de pedidos en el departamento de logística que gestiona finalmente la mercancía. El mismo sistema indica dónde deben colocarse y almacenarse las mercancías que no salgan en el mismo día y para cuando hay que preparar su salida.

Fnac considera que las inversiones y los desarrollos informáticos realizados hasta la fecha se adaptan perfectamente al tamaño actual del almacén y a la cantidad de mercancías que pasan por él. Así, para este año, el presupuesto irá destinado al mantenimiento de las instalaciones y no a nuevas inversiones. Tampoco se prevé ningún otro cambio a corto y medio plazo en la logística ya que su director considera que se han hecho cambios en los últimos años que han dimensionado el almacén hasta alcanzar un tamaño necesario para gestionar el nivel actual de tráfico. El único proyecto de mejora que está en proceso es la instalación de un sistema EDI (intercambio electrónico de datos), pero para su puesta en marcha han de ponerse de acuerdo todos los fabricantes. Este hecho no se ve fácil desde Fnac al ser compañías con poca competencia que muchas veces no tienen clara la conveniencia de cambiar los procedimientos actuales si ello les supone una inversión.

El gestor de este almacén único también cree que el buen funcionamiento se debe a la polivalencia de los trabajadores. Cada profesional recibe formación en todos los puestos de la cadena logística lo que hace muy moldeable la operativa, que puede adaptarse rápidamente a los picos de demanda y oferta de un producto en concreto con unas características determinadas o a otro con un formato totalmente diferente.

Además de la formación, se cuida mucho la comunicación entre los trabajadores y entre éstos y la dirección. Prueba de ello es la creación de grupos de trabajo para analizar diferentes proyectos.

### **3.3.3 FCC Logística**

FCC Logística ha puesto en marcha en Portugal un nuevo servicio de Cross Docking centrado en el sector de refrigerados. Este tipo de operativas comenzaron a finales del año 2012. La gestión se centraliza en la plataforma de FCC Logística en la localidad de Azambuja, en la que los clientes hacen llegar diariamente sus productos refrigerados (entre 0 y 7° C). Allí, los profesionales de FCC Logística reciben la mercancía, preparan el pedido y realizan la entrega al día siguiente de su llegada.

En la actualidad, desde la plataforma de Azambuja, FCC Logística está gestionando mensualmente de media de 20.000 envíos y 6.000 toneladas de productos refrigerados multicliente. El objetivo es que este nuevo servicio beneficie a las compañías que operan desde España pero que sus clientes finales están en Portugal, agilizando la entrega de sus mercancías en el país vecino.

### 3.3.4 Puerto de Santander

El Puerto de Santander, consciente de la necesidad de optimizar la distribución de mercancías en su "hinterland" (La Meseta y el Valle del Ebro), de obtener un posicionamiento competitivo en el mismo, y de aproximarse a sus clientes, participa en el accionariado de dos puertos secos: el de Azuqueca de Henares, en el entorno de Madrid y desde el que ya operan algunas compañías radicadas en Santander, y el de Santander-Ebro, en Luceni, Zaragoza.

Estos centros de consolidación de carga amplían el hinterland del Puerto de Santander y ofrecen servicios de valor añadido a las mercancías, atrayendo a un amplio número de agentes, tanto del transporte marítimo como del transporte terrestre, transitarios y distribuidores.

- **Puerto seco Santander-Ebro:**

El Puerto de Santander extiende su zona de influencia hacia el Valle del Ebro, a través de su participación en este puerto seco situado en las proximidades de Zaragoza, en el área más activa del Corredor del Ebro. Este puerto seco da servicio a más del 60% del mercado nacional, dada su equidistancia con los principales centros de consumo del país (todos ellos en un radio de 300 km). Se encuentra a 400 km del Puerto de Santander y muy próximo la frontera francesa y a los puertos de mayor actividad. Tiene una superficie de 105.700 m<sup>2</sup> destinados a almacenaje, gestión y preparación de vehículos, con 4.500 plazas de aparcamiento.

El Puerto Seco desarrolla servicios de valor añadido a fabricantes y operadores que incluyen manipulación, almacenaje y control de vehículos, mercancías y plataforma para intercambio de transporte combinado, así como depósito aduanero.

- **Puerto seco de Azuqueca de Henares (Guadalajara):**

El Puerto Seco de Azuqueca de Henares ofrece servicios de distribución de mercancía en contenedores y mercancía generala y enlaza cualquier puerto español con la zona centro de España por medio del ferrocarril. Específicamente, tiene un papel fundamental en la distribución de papel prensa en la capital.

Dispone de la Certificación ISO 9002:94 aplicable a la gestión de la Terminal Ferroviaria en operativa de contenedores, vehículos de carga en general, depot y acarreos.

Este puerto seco fue la primera iniciativa privada como extensión de la zona de influencia de los puertos marítimos en España. Está ubicado en el centro de la Península, y en el área de influencia de Madrid.

Se trata de una Terminal Ferroviaria Intermodal, donde se pueden hacer transferencias entre los distintos modos de transporte: carretera, ferrocarril y marítimo. Opera, no sólo tráfico con los puertos marítimos, sino también tráfico con cualquier origen/destino en el interior.

Ofrece servicios de carga y descarga de mercancías, tanto contenedores como carga en general. Es una terminal abierta a cualquier operador o transportista, operando mercancías que entran y salen por carretera o por tren.

Asimismo, se ofrecen otros servicios como depot (sinónimo de Cross Docking o plataformas de distribución, técnica enfocada a la manipulación de mercancías en tránsito tendente a evitar stocks), almacenaje cubierto, consolidación / desconsolidación de cargas, aduana, etc. Los clientes finales son fundamentalmente empresas de transporte, logísticas y productoras.

La zona de influencia de la terminal es el tramo Alcalá-Guadalajara, aunque también da servicio a empresas en el entorno de Madrid. Durante los últimos años, ha realizado continuas mejoras en instalaciones y medios, lo que ha significado una consolidación de los tráfico de mercancías. La terminal dispone de capacidad sobrante para acometer mayores volúmenes.

#### 4. Conclusiones

El "Cross Docking" no es una herramienta, técnica u operativa nueva, pero aún en la actualidad sigue sorprendiendo que muchos profesionales dedicados a la **actividad logística** no conozcan exactamente: qué es, cómo funciona, para qué sirve, qué modalidades existen y cuáles son los beneficios que aportan a la cadena de suministro.

Es un sistema de distribución en el cual la mercancía no se almacena, sino que se prepara inmediatamente para su próximo envío. Es decir, no existen stocks ni almacenajes intermedios. Se centra en un proceso de consolidación y desconsolidación de varios pedidos. Por ello, se reducen costes de almacenamiento, distribución, inventario, personal y financiero, y si se aplica bien se consigue una mayor eficiencia de toda la cadena de suministros.

Aunque no se trate de un tema desarrollado en este Grado de Estadística, creo que debería, al menos introducirse en el mismo como un modelo a desarrollar dentro de la Investigación Operativa.

## 5. Futuras aplicaciones

Dado que este trabajo se ha centrado más en la descripción de dicha estrategia, y en la presentación de algunos de los modelos desarrollados por algunos de los autores que han profundizado a lo largo de los años en dicha técnica, se puede extender el trabajo a la implementación de dichos modelos en algún solver (CPLEX, MINOS, XPRESS IVE, ...) empleando datos generados aleatoriamente, o bien, datos suministrados por algunos de los operados logísticos de la zona.

También se pueden obtener de la base de datos disponible en el Observatorio del Transporte y la Logística en España, y plantear un análisis de la situación del sector logístico en una determinada localidad donde se pretenda instalar un nuevo centro de distribución.

También se propone el diseño y desarrollo de una aplicación dirigida a las empresas del sector que las permita implementar el modelo más adecuado según el alcance que deseen obtener, y la inversión en infraestructura que estén dispuestos a realizar.

## Bibliografía

Abdinnour-Helm, S y M.A. Venkataramanan (1995). A hybrid heuristic for the uncapacitated hub location problem. *European Journal of Operational Research* 106, 489-499.

Abdinnour-Helm, S y M.A. Venkataramanan (1996). Solution approaches to hub location problems. *Annals of Operation Research* 78, 31-50.

Aykin, T. (1990). On the location of hub facilities, *Transportation Science* 22, 155-157.

Aykin, T. (1995a). The hub location and routing problems. *European Journal of Operational Research* 83, 200-219.

Ballou, Ronald H. (1991). *Logística empresarial. Control y Planificación*. Ediciones Díaz de Santos, S.A. , Madrid, España

Barcos, L. (2002). Optimización de rutas de transporte de carga de muchos orígenes a muchos destinos mediante colonias de hormigas. Tesis doctoral dirigida por el Dr. Francesc Robusté (UPC) y la Dra. María Jesús Álvarez (UN). Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Navarra. San Sebastián, España.

Berghman, L., Leus, R., Spieksma, F.C.R.. Optimal solutions for a dock assignment problem with trailer transportation. Springer Science+Business Media.

Burns, L.D., R.W. Hall, D.E.Blumenfeld, C.F. Daganzo (1985). Distribution Strategies that minimize Transportation and Inventory Costs. *Operations Research* 33:3, 469-490.

Chackelson Lurner, C. (2013). Metodología de diseño de almacenes: Fases, herramientas y mejores prácticas. Memoria bajo la supervisión de Ander Errasti Opacua y Javier Santos García. Universidad de Navarra. San Sebastián. España.

Daganzo, C.F. (2005). *Logistics System Analysis*. Fourth Edition. Editorial Springer.

Ernst, A.T. y M. Krishnamoorthy (1999). Solution algorithms for the capacitated single allocation hub location problem. *Annals of Operations Research* 86, 141-159.

Estrada Romeu, M.A. (2007). Análisis de estrategias eficientes en la logística de distribución de paquetería. Tesis docotoral dirigida por el Dr. Francesc Robusté (UPC). E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona de la Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.

Glover, F. y M. Laguna (2002). *Tabu Search*, Kluwer Academia Publishers, Boston.

Handler, G., y Mirchandani, P. (1979). *Location on Networks: Theory and Algorithms*, The MIT Press, Cambridge, MA.

Klincewicz, J.G. (1991). Heuristics for the p-hub location problem. *European Journal of Operational Research* 53, 25-37. North-Holland.

Ministerio de Fomento. Estrategia Logística de España.

Ministerio de Fomento. Informe anual 2016. Observatorio del Transporte y la Logística en España.

O'Kelly, M.E., D.L. Bryan (1998). Hub location with flow economies of scale. *Transportation Research Part B* 32:8, 605-616.

Rodriguez, V. (2002). Metodología para determinar la ubicación de hubs con capacidad limitada. Tesis Doctoral dirigida por el Dr. Francesc Robusté (UPC) y la Dra. María Jesús Álvarez (UN). Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Navarra.

Van Belle, J., Valckenaers, P., Cattrysse, D. (2012), Cross-docking: State of the art. *Omega*.

Otros enlaces de interés:

- ✓ [http://observatoriotransporte.fomento.es/OTLE/LANG\\_CASTELLANO/](http://observatoriotransporte.fomento.es/OTLE/LANG_CASTELLANO/)
- ✓ [https://www.fomento.gob.es/mfom/lang\\_castellano/default.htm](https://www.fomento.gob.es/mfom/lang_castellano/default.htm)
- ✓ <https://www.mecalux.es/>
- ✓ <http://www.cadenadesuministro.es/noticias/>
- ✓ <http://www.transporteprofesional.es/>
- ✓ <http://eur-lex.europa.eu/homepage.html>
- ✓ [http://www.puertasantander.es/cas/puertos\\_secos.aspx](http://www.puertasantander.es/cas/puertos_secos.aspx)