

TRABAJO FIN DE MÁSTER
2009 - 2010

**PROGRAMA OFICIAL DE POSGRADO EN
INGENIERÍA MECÁNICA Y DE MATERIALES**
MÁSTER EN SISTEMAS MECÁNICOS

***MODELIZACIÓN DE PROBLEMAS
DE CÁLCULO DE RUTAS DE LARGA DISTANCIA
CON LLENADO ÓPTIMO DE VEHÍCULOS
(VRP + BPP)***



Centro Politécnico Superior



Universidad de Zaragoza



EUITZ

Autor

D^a. Beatriz Royo Agustín

Director

Catedrático D. Emilio Larrodé Pellicer

Codirector

Dr. D. David Escuín Finol

Septiembre 2010

Área de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes
Departamento de Ingeniería Mecánica

MODELIZACIÓN DE PROBLEMAS DE CÁLCULO DE RUTAS DE LARGA DISTANCIA CON LLENADO ÓPTIMO DE VEHÍCULOS (VRP + BPP)

Resumen

El transporte de mercancías supone un reto en la actualidad, ya que cada vez prima más la inmediatez. Además, aunque este paso de la cadena de suministro no supone un valor añadido al producto, sí que incrementa su precio. Por otro lado, una de las grandes preocupaciones es el consumo energético y la contaminación. Estos motivos, además de los económicos, son los que han llevado a muchos investigadores a dirigir sus esfuerzos hacia la optimización del transporte. A este tipo de cuestiones se las conoce como VRP o “vehicle routing problem”

Se ha comprobado, durante el estudio del estado del arte, que los problemas VRP se centran en un escenario que difiere del presentado en este trabajo. En este caso, en el contexto analizado, un pedido se caracteriza por tener dos localizaciones, el origen donde se recoge la mercancía y el destino donde se deposita. La distancia entre estos puntos es grande necesitando controlar el tiempo de conducción, de disco, de desplazamiento y el de espera para llegar dentro de las ventanas temporales impuestas. Además, existen distintos tipos de mercancía y la capacidad es limitada. Es decir, se persigue modelar este escenario presentando la función objetivo a minimizar y las restricciones que lo caracterizan. Gracias a esto, se puede plantear la metodología de resolución que mejor se ajusta. En este caso, se ha basado en la adaptación de dos investigaciones analizadas: para la agrupación de pedidos y generación de las rutas se ha acomodado un algoritmo sustentado en colonias de hormigas; y para aprovechar al máximo la disposición de los artículos, se han utilizado técnicas heurísticas de forma que también se determina si un pedido puede ser servido en esa ruta.

Índice

Documento Principal	2
1) Introducción	2
1.1) Objetivo del TFM	2
1.2) Marco del TFM	3
1.3) Estructura del documento	4
2) Descripción del problema	6
2.1) Introducción	6
2.2) Características del problema	8
2.2.1) Características generales del transporte nacional de mercancías	8
2.2.2) Características singulares del problema de transporte de este TFM	9
2.3) Requisitos del problema	10
3) Solución del problema: Metodología	12
3.1) Introducción	12
3.2) Datos	12
3.3) Estructura del algoritmo global	13
3.4) Metaheurística para la planificación de rutas	14
3.4.1) Estructura general del algoritmo	14
3.4.2) Construcción de la solución	17
3.5) Heurística para el llenado de vehículos	18
3.5.1) Estructura general del algoritmo	18
3.5.2) Heurísticas de inserción de ítems	20
4) Función objetivo y restricciones	24
4.1) Introducción	24
4.2) Definiciones previas	24
4.2.1) Parámetros	27
4.2.2) Variables	27
4.3) Función objetivo	28
4.4) Restricciones	29
5) Conclusiones	32
Referencias Bibliográficas:	34

Documento Principal

1) Introducción

El presente documento tiene como finalidad presentar un Trabajo Fin de Máster, en adelante TFM, realizado en el ámbito de la Ingeniería Mecánica, concretamente *“organización, gestión y planificación”*, y apoyado por conocimientos de la Ingeniería Informática. Para ello se ha elaborado una memoria dividida en dos partes bien diferenciadas. En la primera de ellas, se encuentra el documento principal, que consiste en una explicación de lo que se ha hecho durante todo el tiempo de desarrollo, dividida en cuatro apartados. La segunda parte, ya más extensa, recoge toda la información intrínseca del trabajo, plasmada en un conjunto de 9 anexos.

La elaboración de una memoria es fundamental ya que en ella se muestra el TFM, es decir, la información textual de lo que se ha realizado, que permita conocer el trabajo al interesado o no en la materia.

1.1) Objetivo del TFM

El objetivo del TFM es el estudio y análisis de un escenario de transporte peculiar para determinar la expresión matemática que representa la función de costes a minimizar y describir la metodología a seguir para optimizar el llenado de vehículos y reducir los kilómetros

a realizar. Este escenario se caracteriza por presentar ventanas temporales de recogida o entrega, cubrir largas distancias entre el origen y el destino, satisfacción de restricciones, etc que complican a los decisores la agrupación de pedidos en los vehículos. Esto pone de manifiesto la necesidad de este estudio, que a posteriori permita el desarrollo de una herramienta informática. El problema tratado es un combinado de dos problemas de difícil solución: por un lado, se tiene el VRPTW (*Vehicle Routing Problem with Time Windows*) y por otro lado, el BPP (*Bin Packing Problem*), pero con algunas peculiaridades. Estos problemas se encuentran detallados en los anexos 2 y 3.

Además de todo esto, y a nivel personal, con este TFM he adquirido los conocimientos básicos sobre el tema en el que se basará mi tesis doctoral. Es decir, optimización del transporte mediante el uso de métodos heurísticos.

1.2) Marco del TFM

El Trabajo se enmarca dentro de la Investigación Operativa, uno de los campos de Investigación del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza en su Área de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes, y en estrecha colaboración con el Doctor David Escuín Finol, Ingeniero Informático que acaba de presentar su tesis doctoral titulada “Desarrollo de un algoritmo basado en técnicas heurísticas para la resolución de problema de gestión de transporte de mercancías en tiempo real”. Por tanto, conoce el tema en profundidad y su ayuda y conocimientos han sido de gran utilidad para el desempeño de este trabajo. Los pasos realizados para abordar el TFM han sido los siguientes:

1. Estudio del escenario a resolver. Presentación de las características que lo delimitan.

Para poder entender el problema a modelar, se tiene que realizar un análisis de las características que lo definen y lo diferencian de los problemas estudiados hasta el momento. Por ello, en esta etapa se examina el escenario apoyándose de un caso práctico. De esta forma se delimitan las características del marco del TFM, los objetivos perseguidos y los requisitos a satisfacer.

2. Estudio del estado del arte.

Para poder dar solución al problema planteado, se tiene que examinar el estado del arte actual. De forma que se pueden identificar las correspondencias y diferencias de los trabajos estudiados con los requisitos del problema planteado en este TFM.

3. Solución del problema

En esta fase se desarrolla la metodología adoptada para resolver el problema y la función de costes, que es el objeto de estudio de este TFM. Esto se ha podido llevar a cabo gracias a los dos pasos previos que permiten delimitar el marco de trabajo y adaptar las soluciones examinadas.

4. Estructura de datos y pseudocódigo

Una vez examinado el problema y tanteada la solución se esbozan las estructuras de datos y el pseudocódigo a utilizar para resolver el problema.

1.3) Estructura del documento

El TFM está organizado en 10 capítulos, cada uno de los cuales viene encabezado por una pequeña introducción de sus contenidos. En el capítulo actual, esta contenido el documento principal, donde se describe el problema y el trabajo realizado dejando a un lado detalles poco relevantes. El resto de los capítulos, denominados anexos, contienen información más detallada del trabajo y descripción de terminología y conceptos que facilitan la comprensión del texto al lector.

Del anexo I al anexo V se adjunta documentación para explicar conceptos que pueden resultar desconocidos para gente no experta en la materia. En el anexo I se explican que son los problemas NP-completos, del cual forma parte el estudiado en este TFM. En los anexos II y III se especifican las características de los dos problemas con los que se identifica, del conjunto de problemas NP-completos. En el capítulo IV, se describen las técnicas utilizadas para resolver este tipo de problemas y en el capítulo V el método utilizado para la resolución de este caso.

Del anexo VI al IX se detalla información explicada en el documento principal de manera más precisa y legible para aclarar lo que puede resultar más complejo de entender. En el anexo VI se describe el problema a través del uso de un caso práctico para ayudar a comprender la complejidad del tema abordado. En el capítulo VII se explican detalles del algoritmo general, que se ha planteado en el documento principal para la resolución del problema. En el anexo VIII, es desarrollada la función objetivo a minimizar usando una terminología más legible pero menos técnica del problema e incorporando el pseudocódigo que también facilita la comprensión. Por último, en el anexo IX se plantean los datos y estructura de los mismos

Por último se incluye la referencia bibliográfica consultada. En primer lugar se citan los libros que se han utilizado para describir el problema; a continuación las obras y artículos en los que se ha apoyado la solución planteada, tanto para la metodología como para la formulación de la función objetivo; finalmente se incluyen todas las direcciones web y documentos utilizados para la descripción de conceptos y terminología utilizada.

2) Descripción del problema

2.1) Introducción

El trabajo desarrollado tiene como finalidad proporcionar ayuda a las empresas de transporte y logística en el desempeño de sus tareas. Esto es, la optimización del llenado de camiones y generación de rutas que permitan minimizar los costes. La consecución de este objetivo generará una disminución de las emisiones de CO₂, provocando indirectamente un beneficio global.

Los estudios sobre el diseño de rutas se centran en escenarios donde los itinerarios a generar están basadas en varios puntos de entrega que parten de un almacén o depósito, al cual deben regresar los vehículos una vez finalizada la expedición. Este tipo de problemas está basado en combinatoria, donde el número de posibles soluciones aumenta conforme se incrementa el número de clientes a repartir y por ello la búsqueda de la solución óptima hace que se convierta en un problema intratable conocido como problema NP-completo (anexo I). Este tipo de problemas se divide en todo tipo que plantee la búsqueda de la mejor solución en un espacio de combinaciones muy grande, como el problema de cálculo de rutas o VRP (anexo II)

El problema tratado en este trabajo difiere en varios puntos del planteamiento general del VRP. En el original, los clientes se identifican como los puntos de entrega de la mercancía perteneciente al único almacén de partida; la carga de cada cliente es pequeña de forma que resulta trivial el agrupamiento de la misma siempre que se satisfaga la capacidad del vehículo; las distancias entre los clientes y entre estos y el depósito de recogida de la mercancía son pequeñas, de forma que en una jornada laboral de un transportista puede ser resuelta. A este escenario de transporte en el que las expediciones se realizan en la ciudad o entre zonas cercanas se le denomina transporte capilar de mercancía. En el caso que ocupa a este TFM, un cliente se corresponde con el par origen – destino. Es decir, cada uno se caracteriza por tener un pedido en el que hay que hacer una recogida en un punto y la entrega en otro punto; las distancias entre el origen y destino de un cliente son largas; las distancias entre distintos orígenes y entre distintos destinos pueden ser pequeñas; las cargas suelen ser grandes para compensar el coste derivado del desplazamiento; estas características definen lo que se conoce como transporte nacional de mercancías. El hecho de cubrir largas distancias hace que se necesite un servicio con tiempos que incluyen como mínimo un tiempo de 24 horas, ya que se debe atender al descanso necesario si se supera el tiempo de conducción y/o el tiempo de disco. Además resulta complicado agrupar a varios clientes (origen – destino) en un mismo vehículo, debido a: el volumen de la carga, los tiempos, el hecho de considerar si resulta económico desplazarse para realizar la agrupación y otra serie de condiciones que lo complican aún más. Es decir, la optimización en el transporte capilar pasa por recorrer la menor distancia posible para visitar a todos los clientes, a esto se le pueden añadir todo tipo de limitaciones que complican al problema y derivan en distintas versiones expuestas en el anexo II; en el caso del transporte nacional de mercancías el objetivo fundamental es reducir el número de vehículos, de forma que, se debe determinar la agrupación de clientes que viajaran juntos en una ruta e intentar minimizar las distancias recorridas. A modo de esquema, en la tabla 2.1 se muestran las diferencias comentadas entre el transporte capilar y el transporte nacional.

CRITERIO	CAPILAR	NACIONAL
Cliente	Destino de entrega	Par origen – destino
Almacenes	Uno en origen	Uno por cliente
Volumen de carga de cliente	Pequeño	Grande
Distancia origen – destino	Pequeña	Grande
Distancia ente clientes	Pequeña	Grande/Pequeña
Reto	Minimizar la distancia para visitar a todos los clientes y agrupación de clientes en un vehículo	Agrupar a clientes en una ruta y reducir la distancia global recorrida.

Tabla 2.1. Comparativa “Transporte capilar” vs. “Transporte nacional”.

2.2) Características del problema

En este apartado se describen las generalidades del transporte nacional de mercancía y las peculiaridades que se han definido en el caso de estudio de este TFM.

2.2.1) Características generales del transporte nacional de mercancías

Los clientes están constituidos por el par origen (recogida de la mercancía) y el destino (entrega de la mercancía). A partir de ahora a un cliente se le denominara pedido y se representara como “ P_i ” (r_i , e_i). Es decir, pedido realizado por el cliente “ i ” con origen o recogida en el punto “ r_i ” y destino o punto de entrega en el punto “ e_i ”.

La distancia entre el origen y el destino de un pedido es grande, o lo que es lo mismo, los kilómetros entre r_i y e_i correspondientes a P_i son elevados. De manera que, en algunas ocasiones, es necesario realizar parada y cumplir el tiempo de descanso por superar el tiempo de conducción y el tiempo de disco.

Las distancias ente orígenes de distintos clientes y entre destinos de distintos pedidos puede ser elevada, pequeña o incluso nula si se trata de la misma localización. Es decir, si se tiene a P_i (r_i , e_i) y a P_j (r_j , e_j), puede ocurrir:

- Localización de $e_i \in P_i$ coincida con la localización de $e_i \in P_j$.
- Localización de $r_i \in P_i$ coincida con la localización de $r_j \in P_j$.
- Distancia entre $e_i \in P_i$ respecto de $e_i \in P_j$, puede ser elevada o pequeña.
- Distancia entre $r_i \in P_i$ respecto de $r_j \in P_j$, puede ser elevada o pequeña.

La relación entre orígenes y destinos determinará la posibilidad de agrupamiento.

El volumen de carga a transportar entre un origen r_i y un destino e_i correspondientes a un pedido P_i suelen ser elevados, aunque en muchas ocasiones se consideran cargas completas cuando no lo son, permitiendo en estos casos juntar a varios clientes en un vehículo.

El volumen de las cargas, la variable tiempo y el coste de manipulación hacen que el orden de llenado de camión se realice siguiendo una estructura LIFO o "*Last in first out*". Es decir, el último cliente al que se le ha recogido la mercancía será el primero en ser entregado y por ello la posición en el vehículo será la más cercana a la puerta.

2.2.2) Características singulares del problema de transporte de este TFM

En este apartado se listan las características que se han definido para este problema en particular.

- Existencia de ventanas temporales en el origen y en el destino de un cliente. Lo que es igual a que tanto r_i como e_i , correspondientes a un pedido P_i , poseen un intervalo temporal en el que se exige la realización de la operación correspondiente. La amplitud de este intervalo temporal depende del tipo de cliente.
- Presencia de tres tipos de carga que permiten clasificar la mercancía en uno de estos tres conjuntos: frío, isoterma o normal. La clase de carga frío exige vehículos con cámara. La clase isoterma se considera alimentación y no necesita frío. La carga isoterma se puede mezclar con la carga frío si y sólo si viajan en un vehículo con temperatura controlada. Sin embargo, ninguna de estas dos se permite que viajen mezcladas con la mercancía calificada como normal.
- Los tipos de clientes que se tienen se clasifican en dos grupos. Se considera que existen almacenes propios donde se realizan labores de picking. Estos almacenes se encuentran distribuidos por la geografía española tal y como se muestra en la figura 2.1 y se les denomina clientes internos. Por otro lado se tienen a las fábricas, almacenes y plataformas independientes que solicitan el movimiento de mercancías entre ellos, a este grupo de clientes se les va a llamar clientes externos. La diferencia será la amplitud de las ventanas temporales: para los internos se consideran ventanas más amplias, ya que se puede flexibilizar la hora de preparación del pedido en función de la hora en que se determina la entrega y recogida; en cambio, para los clientes externos las ventanas serán muy restrictivas.



Figura 2.1. Localización de los almacenes de los clientes internos.

En el anexo VI se incluye un caso práctico que explica el problema con más detalle, con el objeto de que el interesado comprenda la complejidad de alcanzar la finalidad perseguida.

2.3) Requisitos del problema

Una vez explicado el escenario de trabajo, en este apartado se listan los requerimientos que debe satisfacer la solución.

- Existe un conjunto de clientes $\{N\}$.
- Un cliente está formado por el par origen – destino o recogida – entrega representado por $P_i (r_i, e_i)$, tal y como se explico en el apartado 2.2.
- Los clientes pueden ser tanto internos como externos.
- La prioridad de ambos tipos de clientes es equitativa.
- Se deben satisfacer las ventanas temporales para cada operación de un cliente Para la recogida y para la entrega, es decir, $VT (recogida/entrega) = [hmin, hmax]$.
- Si se llega antes de $hmin$ se aplicará un tiempo de espera. Si se llega tras $hmax$ el pedido no será servido.
- Se debe considerar el tiempo de conducción, el tiempo de disco y el tiempo descanso.
- Se tienen que tener en cuenta las clases de carga ya que esto determina compatibilidad a la hora de mezclarse en un vehículo y restringe el tipo de camión a usar.
- La capacidad del vehículo es limitada, se denomina C y es la misma para todos los vehículos.
- Las dimensiones de un vehículo son limitadas, se considera $L \times W$ a la superficie del suelo, es decir, L corresponde al largo y W al ancho.
- No se permite apilabilidad, es decir, que los paquetes monten unos encima de otros.
- No se puede superar la capacidad C del vehículo.
- No se puede sobrepasar la superficie disponible del suelo del vehículo.
- El orden de agrupamiento de los clientes será LIFO.

3) Solución del problema: Metodología

3.1) Introducción

En este apartado del documento se describe la metodología propuesta para la resolución del problema planteado en el apartado 2 de este documento. Para ello, y en primer lugar, se describen los datos que son necesarios para modelar el problema. En segundo lugar, se presenta el esquema global del algoritmo que generara la solución general. Por último, se describen los dos algoritmos metaheurísticos necesarios para realizar la planificación de las rutas y encontrar la ubicación óptima de los paquetes de cada cliente en el vehículo.

3.2) Datos

Los datos necesarios para la resolución del problema se listan a continuación. Una descripción más precisa sobre la estructura, tipos, etc. se encuentra en el anexo IX.

Punto: Con este dato se caracteriza la estructura de datos utilizada para representar las localizaciones correspondientes al origen y al destino de un pedido. O lo que es lo mismo, posición geográfica e intervalo temporal de operación (entrega o recogida).

Ítem: Contendrá las dimensiones de un paquete correspondiente a un pedido.

Pedido: Esta estructura define los atributos que determinan a un pedido. Es decir, el punto de origen de donde se recoge y el punto destino al que es transportado el pedido, los kilos a transportar, el conjunto de ítems,...

Matriz Distancias: Cada celda de la matriz será la distancia real (carretera) que separa el punto de la columna i con el punto de la columna j , siendo j distinta de i .

Tipología: Tipos de carga a transportar: *Frio, Isotermo, Normal*.

Ruta: Secuencia de pedidos.

Solución: Secuencia de rutas.

Vehículo: Características que definen al medio de transporte: capacidad, dimensiones, tipo de carga que transporta.

3.3) Estructura del algoritmo global

El algoritmo general planteado se divide en tres etapas, tal y como se muestra en la figura 3.1. A continuación, se describe a grandes rasgos el significado de cada una representada con una caja. Una explicación más detallada de este esquema se encuentra en el anexo VII.

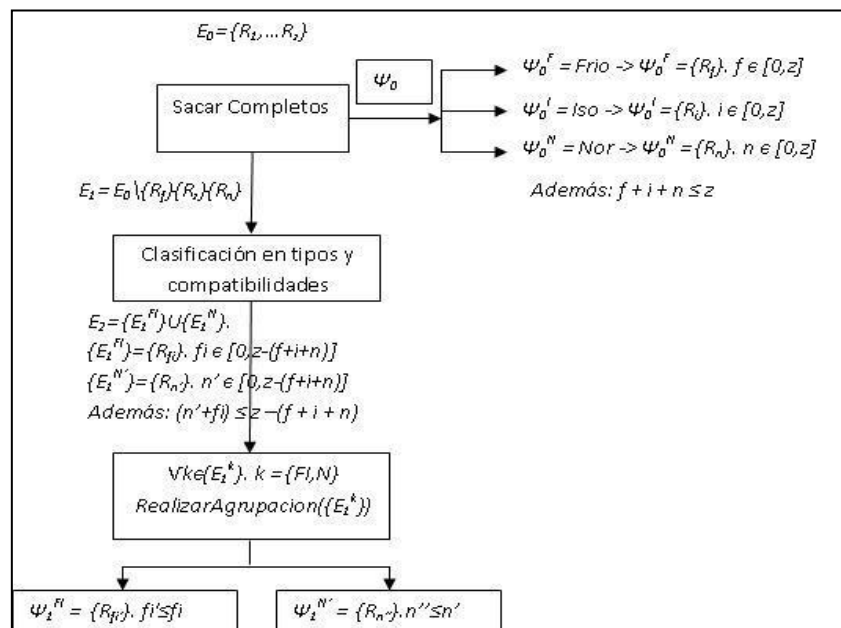


Figura 3.1. Estructura algoritmo general.

Sacar Completos: Tiene como objeto sacar de la agrupación o del cálculo aquellos pedidos que se consideran carga completa. Como salida se obtienen las rutas directas Ψ_0 y las cargas sobrantes que van al paso siguiente para ser agrupadas.

Clasificación en tipos y compatibilidades: En este caso, encontramos únicamente los pedidos que no alcanzan para viajar solos en un vehículo, es decir, pueden viajar agrupados. Para satisfacer la restricción de compatibilidad y reducir el número de pedidos que entraran en la combinación se divide el conjunto en dos grupos (Frio + Isotermo y Normal).

Realizar Agrupación: El objetivo es realizar la agrupación de clientes de cada subconjunto del paso anterior (Frio + Isotermo y Normal). En este apartado se aplican las técnicas metaheurísticas de planificación de rutas y llenado del camión, que se explican en los siguientes apartados. Como resultado de este paso se obtienen los itinerarios con los pedidos agrupados $\Psi_1 = \Psi_1^F \cup \Psi_1^N$.

Como resultado del algoritmo se obtendrán las rutas a realizar por los vehículos. La solución será por lo tanto, $S = \Psi_0 \cup \Psi_1$.

3.4) Metaheurística para la planificación de rutas

En este apartado se plantea el algoritmo adaptado a partir de una investigación realizada por L. Barcos, V. Rodríguez, M.J. Álvarez y F. Robusté denominado "*Routing design for less-than-truckload motor carriers using Ant Colony Optimization*". El objetivo es realizar la agrupación de los pedidos en vehículos con el objeto de disminuir el número de recursos a utilizar y el kilometraje total recorrido.

3.4.1) Estructura general del algoritmo

Este algoritmo está basado en una metaheurística denominada "Algoritmo de colonia de hormigas", descrito en el anexo V, y se ejecutará dos veces en paralelo, con la intención de reducir el tiempo consumido. La entrada para cada uno de los procesos será uno de los subconjuntos clasificados en el proceso "Clasificación en tipos y compatibilidades" representado en la figura 3.1.

La estructura general del algoritmo se muestra en la figura 3.2. A continuación, se realiza una breve descripción de cada etapa. Para encontrar, un análisis más detallado de este algoritmo hay que recurrir al anexo VII.

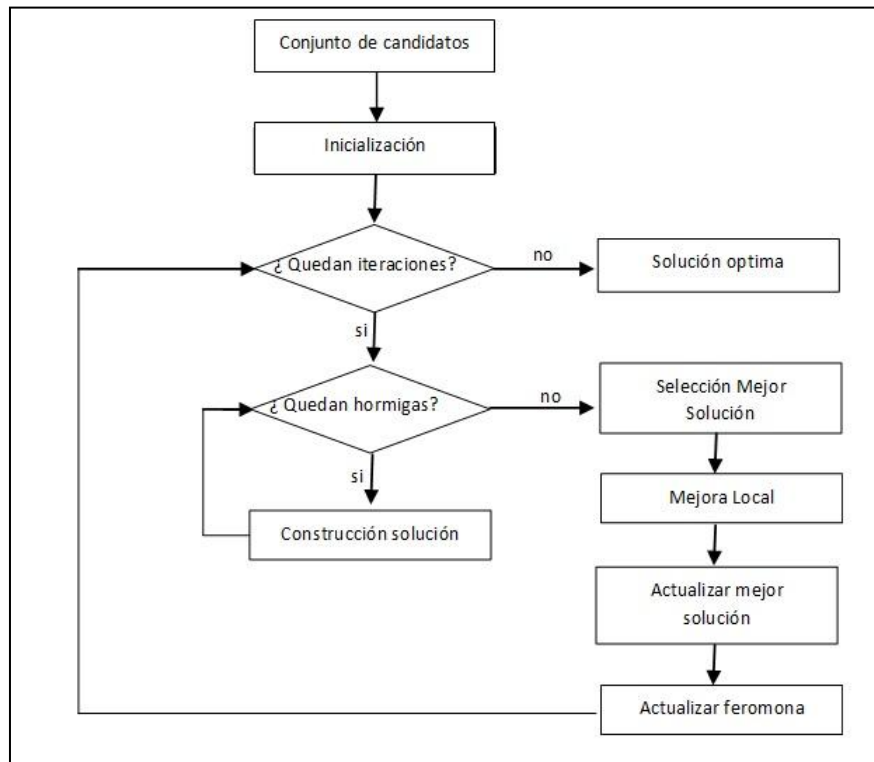


Figura 3.2. Estructura general del algoritmo de planificación de rutas.

El primer paso tiene como objetivo reducir el número de posibles combinaciones del subconjunto seleccionado. Para ello, se definen cuatro grupos de candidatos $\{G^1\}$, $\{G^2\}$, $\{G^3\}$ o $\{G^4\}$. En este TFM se ha considerado que un pedido está constituido por el par origen – destino, y se establecen una serie de relaciones con el resto de pedidos. A continuación, se describen las correspondencias que se pueden generar entre pedidos, apoyadas por un dibujo para facilitar la comprensión. La formulación y descripción más detallada de estas relaciones se explica en el anexo VII.

Mismo origen y mismo destino $\{G^1\}$

Se define $\{G_i^1\}$, como el conjunto de pedidos que tienen el mismo origen y el mismo destino que el pedido $P_i(r_i, e_i)$. En la figura 3.3 se muestra el significado de $\{G_{ij}^1\}$, es decir la relación $\{G^1\}$ entre el pedido i y el pedido j .

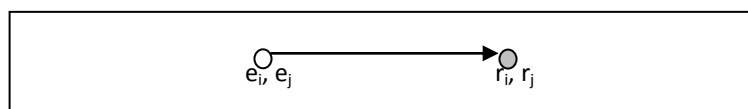


Figura 3.3. Relación $\{G^1\}$ entre el pedido i y el pedido j .

Mismo origen y distinto destino $\{G^2\}$

Se define $\{G_i^2\}$, como el conjunto de pedidos que tienen el mismo origen y diferente destino que el pedido $P_i(r_i, e_i)$. En la figura 3.4 se muestra el significado de $\{G_{ij}^2\}$, es decir la relación $\{G^2\}$ entre el pedido i y el pedido j .

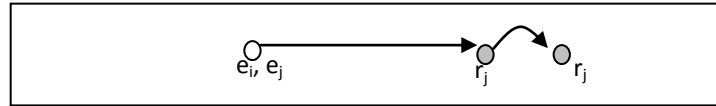


Figura 3.4. Relación $\{G^2\}$ entre el pedido i y el pedido j .

Distinto origen y mismo destino $\{G^3\}$

Se define $\{G_i^3\}$, como el conjunto de pedidos que tienen distinto origen y mismo destino que el pedido $P_i(r_i, e_i)$. En la figura 3.5 se muestra el significado de $\{G_{ij}^3\}$, es decir la relación $\{G^3\}$ entre el pedido i y el pedido j .

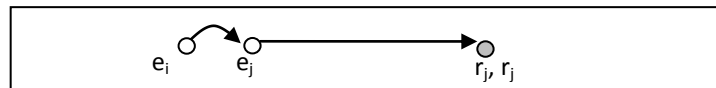


Figura 3.5. Relación $\{G^3\}$ entre el pedido i y el pedido j .

Distinto origen y distinto destino $\{G^4\}$

Se define $\{G_i^4\}$, como el conjunto de pedidos que tienen distinto origen y distinto destino que el pedido $P_i(r_i, e_i)$. En la figura 3.6 se muestra el significado de $\{G_{ij}^4\}$, es decir la relación $\{G^4\}$ entre el pedido i y el pedido j .

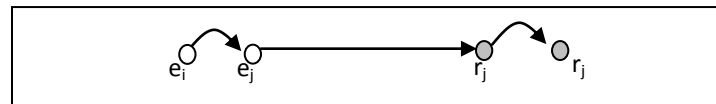


Figura 3.6. Relación $\{G^4\}$ entre el pedido i y el pedido j .

En el caso $\{G^2\}$, $\{G^3\}$ y $\{G^4\}$, los conjuntos serán ordenados en orden creciente de distancias. En el primer caso será la que existe entre los destinos, en el segundo entre los orígenes y en el tercero la suma de la distancia presente entre los orígenes y los destinos.

Una vez finalizado el paso anterior, se ordenan los pedidos a agrupar en una lista de mayor a menor distancia entre el origen y el destino del pedido.

A continuación, comienzan dos bucles. El primero de ellos es el que determina el refinamiento de la solución, es decir, cuantas veces se va a pulir la mejor solución encontrada hasta el momento. En el interior de este bucle se encuentra otro proceso iterativo en el que se

genera la colonia de hormigas, es decir, se genera un número de soluciones igual al número de iteraciones del bucle. La colonia de hormigas es resultado de la ejecución de un algoritmo denominado “construcción solución” -explicado en el apartado 3.4.2.- Correlativamente, se realiza el refinamiento de la mejor solución encontrada hasta el momento. Para ello, primero, se selecciona la mejor solución de la colonia de hormigas, después, se realiza una mejora local sobre la misma, explicada también en el anexo VII, y por último se compara si ésta es mejor que la mas buena encontrada en las iteraciones anteriores. En caso afirmativo, ésta pasa a ser la solución, en caso contrario, se deja la que estaba. Por último se actualiza el valor de la feromona.

Para determinar si una solución es viable y evaluar si una propuesta es mejor que otra, se necesita definir una función objetivo y las restricciones que la delimitan. Esta función y limitaciones son explicadas en el apartado 4 de este documento.

3.4.2) Construcción de la solución

Este es el algoritmo encargado de generar la solución, es decir, la agrupación de pedidos en rutas. El esquema de funcionamiento se presenta en la figura 3.7 y después se explica en líneas generales el significado de este esquema. Una descripción más detallada del mismo se encuentra en anexo VII.

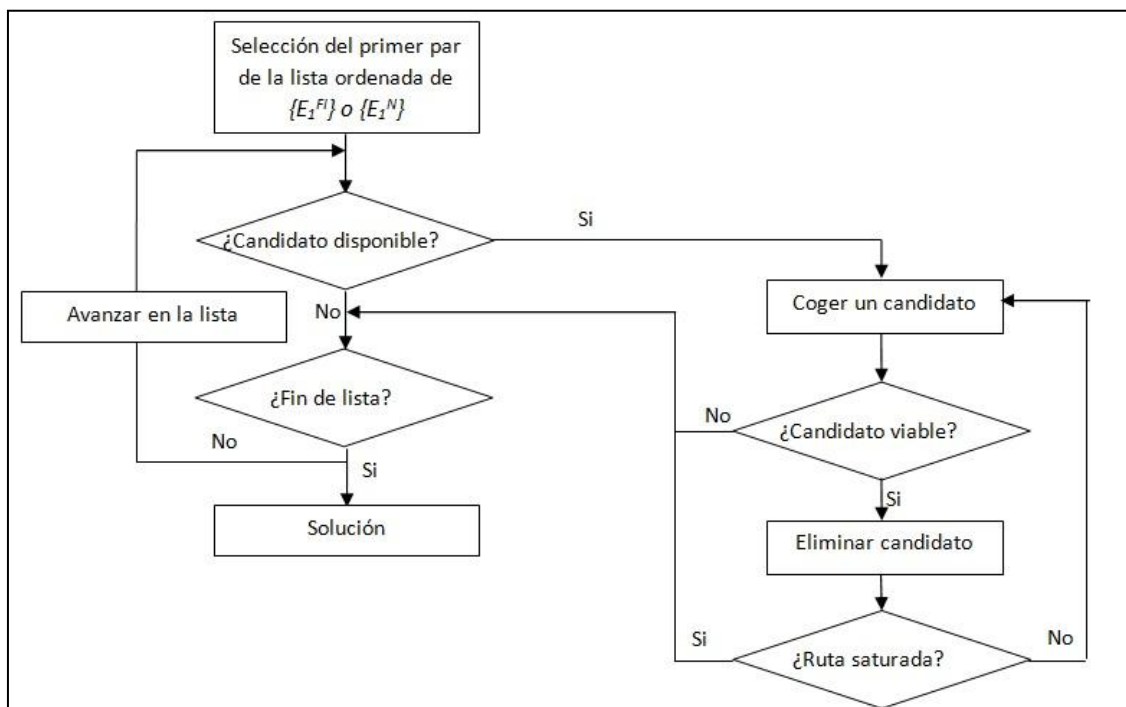


Figura 3.9. Construcción solución.

De la lista ordenada de pedidos se selecciona el primero de ellos. A continuación, se comprueba si existe algún candidato disponible para agrupar con este. En caso negativo, se comprueba si existen más pedidos en la lista ordenada y se coge el siguiente, si no existen más pedidos es porque se ha obtenido la solución. En caso de existir algún candidato en $\{G^1\}$, $\{G^2\}$, $\{G^3\}$ o $\{G^4\}$, se selecciona el primero de cada lista. Si resulta más de uno, la hormiga lo selecciona de forma probabilística, tal y como se explica en el anexo VII. A continuación, se comprueba si la solución es viable, para ello se utiliza la función objetivo y restricciones descritas en el apartado 4 de este documento. Para comprobar la viabilidad, una de las restricciones a satisfacer es si los ítems del pedido caben en el hueco del camión, para ello se utiliza el algoritmo explicado en el siguiente apartado 3.5. En caso de resultar viable, este pedido es eliminado de todas las listas de candidatos en las que aparece y de la lista de ordenados. Si la ruta permite insertar otro pedido (no está saturada en capacidad o tiempo) o en caso de que el candidato no sea viable se sigue examinando la lista de candidatos hasta que se satura o no quedan candidatos para el pedido inicial. Entonces esta ruta pasa a la solución del problema, se elimina el pedido inicial de todas las listas en las que aparece y se pasa a examinar el siguiente pedido de la lista de ordenados en caso de existir. Si no hay mas pedidos en esta lista la solución con el conjunto de rutas a realizar es devuelta.

3.5) Heurística para el llenado de vehículos

Gracias a esta heurística se permite realizar un llenado del camión que resulte óptimo, ya que se utilizan procedimientos que determinan cuál es la mejor ubicación, de forma que si no encuentra ninguna disposición para insertar los ítems, una de las restricciones a satisfacer por la función objetivo resulta violada.

3.5.1) Estructura general del algoritmo

Para encontrar la solución se ha adaptado la propuesta realizada por Emmanouil E. Zachariadis, Christos D. Tarantilis y Christos T. Kiranoudis en 2007 denominada "*A Guided Tabu Search for the Vehicle Routing Problem with two-dimensional loading constraints*".

El proceso seguido por el algoritmo se presenta en la figura 3.10, es explicado a continuación.

Como entrada al algoritmo se tiene el conjunto de ítems del pedido P_i , caracterizados con sus dimensiones, la superficie disponible del vehículo y la disposición del conjunto de ítems de los $(i-1)$ pedidos anteriores. Con esta información se tiene que encontrar la ubicación

de los ítems del pedido P_i en el hueco sin tocar la disposición de los paquetes de los otros clientes que ya están dentro.

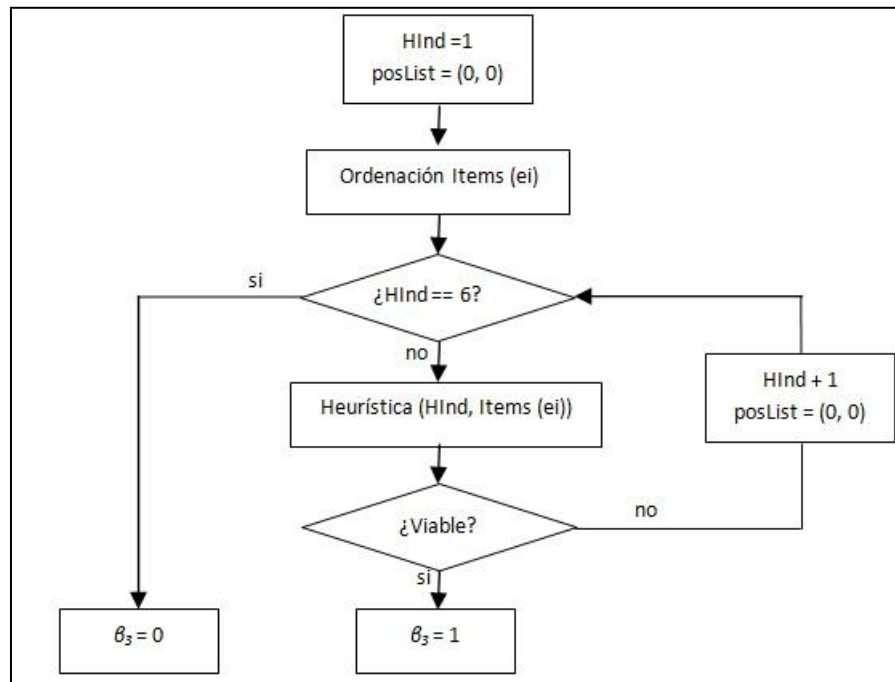


Figura 3.10. Algoritmo de llenado de un camión.

Sea $\text{ítems}(e_i)$ el conjunto de paquetes del pedido P_i a insertar. El algoritmo comienza ordenando los paquetes de mayor a menor superficie, de forma que los ítems serán sucesivamente seleccionados para ser introducidos. Se tiene a PosList , que es una lista con las posiciones disponibles del camión para meter los ítems. Cuando se inicia una ruta, es decir, se introduce el primer cliente en un vehículo, el contenido de PosList es (0, 0), es decir, la esquina izquierda del frontal. Si un ítem es introducido se generan cuatro nuevas posiciones donde introducir el siguiente ítem, tal y como se muestra en la figura 3.11, entonces se elimina de esta lista la posición donde ha sido colocado. La ubicación de los paquetes se realiza utilizando una de las 5 heurísticas que se describen en el apartado 3.5.2. En primer lugar, se prueba con la primera heurística, si no se encuentra una disposición para todos los elementos se prueba con la siguiente heurística hasta que se obtiene una disposición buena y por tanto es viable, o hasta que no se encuentra solución tras aplicar las 5 heurísticas y genera por tanto una solución inviable.

Las heurísticas son aplicadas orden creciente de complejidad computacional, debido a que los experimentos realizados en el estudio del original, indican que hacerlo de esta forma reduce el tiempo global consumido.

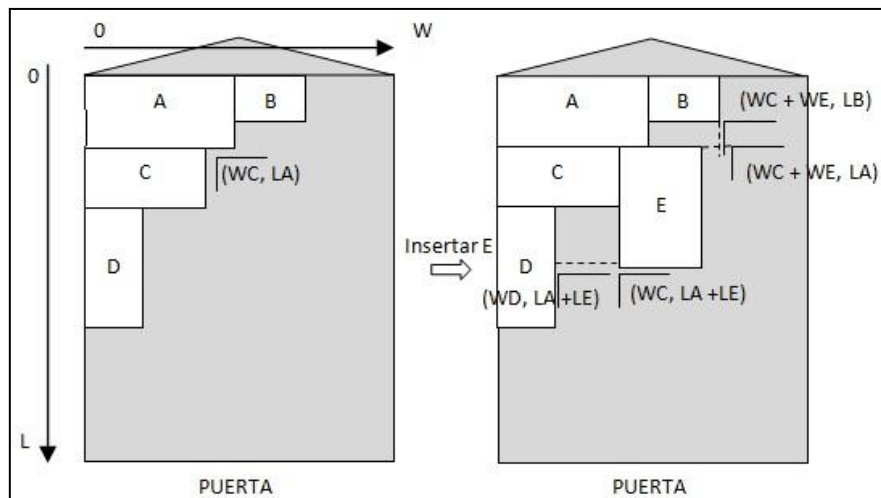


Figura 3.11. Inserción de un ítem en la superficie del camión.

3.5.2) Heurísticas de inserción de ítems

Cada una de las cinco heurísticas utiliza un criterio distinto para seleccionar la posición donde ubicar el ítem.

Heurística 1 – Bottom Left Fill (Axis W) (Chazelle 1983).

De todas las posiciones viables de posList, la posición seleccionada es la que tiene la coordenada del eje de la anchura menor (mínimum W-axis coordinate). En la figura 3.12 se explica el funcionamiento. Como $WA < WB$ el ítem C es insertado al lado de A.

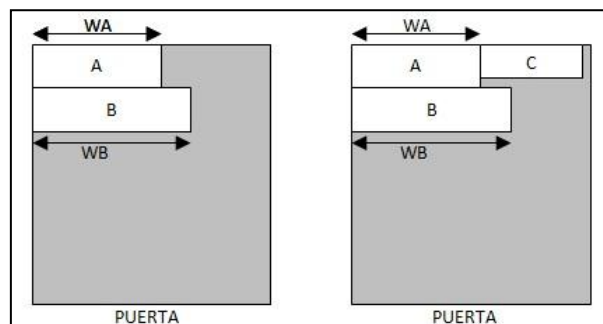


Figura 3.12. Heurística 1 "Bottom Left Fill (Axis W)".

Heurística 2 – Bottom Left Fill (Axis L) (Chazelle 1983).

De todas las posiciones viables de posList, la posición seleccionada es la que tiene la coordenada del eje de la longitud menor (mínimum L-axis coordinate). En la figura 3.13 se explica el funcionamiento. Como $LA < LB$ el ítem C es insertado debajo de A.

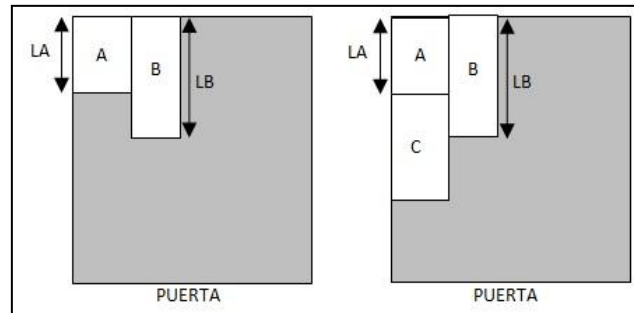


Figura 3.13 Heurística 2. "Bottom Left Fill (Axis L)".

Heurística 3 – Max Touching Perimeter Heuristic (Lodi et al. 1999).

De todas las posiciones viables de posList, el perímetro total de contacto de la pieza insertada es calculado como la suma de las esquinas comunes de la pieza insertada con las esquinas de la pieza y además las esquinas de la superficie del vehículo, como se muestra en la figura 3.14, es decir, la pieza es colocada en la posición que maximiza la superficie de contacto.

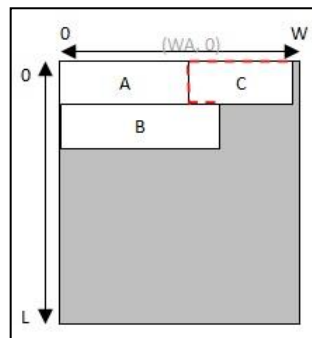


Figura 3.14. Heurística 3. "Max Touching Perimeter Heuristic".

Heurística 4. - Max Touching Perimeter No Wall Heuristic (Lodi et al. 1999).

De todas las posiciones viables de posList, el perímetro total de contacto de la pieza insertada es calculado como la suma de las esquinas comunes de la pieza insertada con las esquinas de la pieza, sin considerar en este caso las paredes del vehículo, como se observa en la figura 3.15. La pieza es colocada en la posición que maximiza la superficie de contacto.

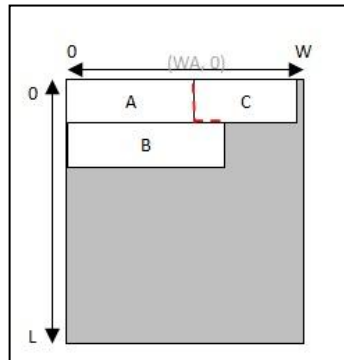


Figura 3.15. Heurística 4 "Max Touching Perimeter No Wall Heuristic".

Heurística 5. - Min Area Heuristic (Lodi et al. 1999).

De todas las posiciones viables de posList, el área de sus correspondiente superficie es calculada como se muestra en la figura 3.16. La posición seleccionada es aquella que genera el menor área. Para la posición $(WA, 0)$ le corresponde un área de $(W-WA) \times LA$, para la posición (WB, L) será de $(W-WB) \times (L-LA)$ y por último para la situación $(0, LA + LB)$ le concierne una superficie de $W \times (L-LA - LB)$. De las heurísticas propuestas esta es la que más desaprovecha el espacio.

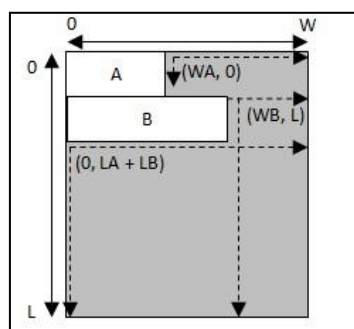


Figura 3.16. Heurística 5 "Min Area Heuristic"

4) Función objetivo y restricciones

4.1) Introducción

En este apartado se realiza la formulación del problema, es decir, se define la función objetivo y las restricciones que tiene que satisfacer.

Esta etapa del análisis resulta muy importante al permitir caracterizar el problema y tener una visión más precisa del mismo, ya que se plantea la función a minimizar (costes) o maximizar (beneficio, utilidad) y las condiciones que tiene que cumplir para considerar a una solución válida. Esta definición, además, es independiente del método heurístico empleado, de forma que una vez realizado este paso se puede determinar que técnica es la más apropiada.

La descripción del problema se realiza utilizando expresiones algebraicas, puesto que es el método formal. En el anexo VIII se encuentra una caracterización del problema con una terminología más sencilla que la hace más legible, incluyendo el pseudocódigo para implementar las restricciones.

4.2) Definiciones previas

Antes de pasar con el desarrollo del capítulo, conviene dejar claro la nomenclatura utilizada en este trabajo que coincide en algunas ocasiones con la utilizada por otros autores:

Pedidos: una instancia del problema planteado contiene f pedidos. El juego de f pedidos está compuesto a su vez por f recogidas $C = \{r_1, \dots, r_f\}$ y f entregas $E = \{e_1, \dots, e_f\}$. El problema se define con un grafo $G = (P, A)$ donde $P = \{P_1, \dots, P_f\}$ representa el conjunto de pedidos. Cada $p_i \in P$ se representa por una par de nodos o puntos. El primer nodo simboliza la recogida de la mercancía y el segundo la entrega, es decir, $p_i = (r_i, e_i) \quad \forall i \in \{1, \dots, f\}$. Por tanto se tienen $2f$ nodos o puntos donde $2f = N$. El problema se puede representar a su vez como $G = (N, A)$, con N número de nodos o puntos y $A \subseteq N \times N$ representa las posibilidades de viaje entre los nodos. A cada arco $(i, j) \in A$, le corresponde un coste en función de la distancia entre el nodo i y el nodo j . Cada orden tiene una demanda no negativa q_i expresada en kilogramos y esta misma demanda l_i expresada en $m^2 \quad \forall i \in \{1, \dots, f\}$.

Vehículos: Se tendrá un conjunto de vehículos para realizar las rutas $V = \{v_1, \dots, v_m\}$. Los vehículos de los que se dispone tienen la misma capacidad, misma superficie y misma velocidad, siendo Q la capacidad, $L \times W$ la superficie y V la velocidad. Se tendrán dos tipos de vehículos {Frio, Normal} y se dispondrá de un número ilimitado de cada tipo en cada origen de una ruta. El vehículo partirá del origen del primer pedido de la ruta y finalizará en el destino del primer pedido. Por tanto se tendrá que $m \leq f$, siendo m el número de vehículos necesarios para realizar las expediciones y f el número de pedidos. Además, sea m_f el número de vehículos de tipo frio necesarios y m_n los vehículos de tipo normal, entonces $m_f + m_n = m$.

Matriz de distancias: El problema se ha definido como $G = (N, A)$, donde $N = C \cup E$ y $n = 2f$ el número de nodos y $A = N \times N$ la matriz de distancias asimétrica. Cada componente de la matriz A es la distancia real por carretera entre el nodo i y el nodo j . Es decir, sea $d_{i,j}$ la distancia entre el punto i y el punto j , entonces:

$$d_{i,j} = A(i,j), \quad \forall i,j \in N \quad (1)$$

$$d_{i,j} \neq d_{j,i}, \quad \forall i,j \in N \quad (2)$$

Tiempo de Viaje: Se define $t_{i,j}$ como el tiempo necesario para recorrer $d_{i,j}$ o distancia entre dos puntos i, j a una velocidad V .

$$t_{i,j} = d_{i,j} / V \quad \forall i,j \in N \quad (3)$$

Ruta: Una ruta comienza en el origen del primer pedido y finaliza en el destino del primer pedido de la misma. Está formada por un conjunto de pedidos F' , con un total de f' , que son servido una sola vez, es decir, la recogida se realiza una vez y la entrega una sola vez siguiendo

la estructura Lifo (primero en recoger, ultimo en entregas). Es decir, para cada vehículo $h = (1, \dots, m)$ una ruta es una secuencia de puntos, donde cada par de puntos corresponde a un pedido y son servidos según la estructura Lifo, por consiguiente:

$$R_h = \bigcup_{g=1}^f r_g \bigcup_{g=f}^1 e_g, \quad \forall h \in [1, M] \quad (4)$$

Ventanas Temporales: Cada par de puntos correspondientes a un pedido tienen ventanas temporales. La ventana temporal de un nodo i viene dada por el intervalo $[a_i, b_i]$ donde a_i y b_i representan la cota inferior y la superior para realizar la operación (entrega, recogida) respectivamente. Si un vehículo llega al nodo antes de a_i se le permite esperar hasta a_i y comenzar el servicio a continuación, incurriendo en una penalización que se representa por el coste en función del tiempo de espera. Para asegurar que se cumple la ventana temporal se define d_i para denotar cuando el vehículo sale del nodo i y s_i cuando comienza el servicio en el nodo i . A la hora de calcular d_i y s_i , se tienen que considerar los tiempo de ir de un nodo i a un nodo j , el tiempo de servicio en el nodo i (TS), tiempo de descanso (TC) en caso de superar el tiempo límite de conducción (LC) y el tiempo de descanso (TD) si se supera el límite de disco.

Compatibilidades: Se tienen 3 tipos de mercancía, $\{F, I, N\}$, frío, isoterma y normal respectivamente, de forma que un pedido pertenecerá a uno y solo uno de los 3 y se tienen 2 tipos de vehículos $\{F, N\}$, frío y normal donde un vehículo pertenecerá a uno y solo uno de los dos. Sea $clase(P_i)$ tipo de mercancía al que pertenece el pedido i y $clase(v_k)$ tipo de vehículo al que pertenece el responsable de realizar la ruta k , se define:

$$P_{ij}^k = \begin{cases} 0, & \text{si } clase(P_i) = \{N\} \text{ y } clase(P_j) \neq \{N\} \\ 0, & \text{si } clase(P_i) = \{F\} \text{ y } clase(v_k) = \{N\} \\ 0, & \text{si } clase(P_i) = \{I\} \text{ y } clase(P_j) = \{F\} \text{ y } clase(v_k) \neq \{F\} \\ 1, & \text{en cualquier otro caso.} \end{cases} \quad \forall i, j \in N, \forall k \in [1, M] \quad (5)$$

Gracias a (5) se garantiza que una mercancía clasificada como normal no puede viajar mezclada con otra. Por ejemplo, si pertenece a la clase frío debe transportarse obligatoriamente en vehículo con cámara. Sin embargo, se permite mezclar un pedido frío con uno isoterma si el vehículo es de la clase frío y un isoterma puede ser llevado en un vehículo normal, si viajan solo pedidos de ese tipo.

4.2.1) Parámetros

T: coste por unidad de distancia recorrida (€/ km).

O: coste de una operación {recogida, entrega} (€)

B: coste por unidad de tiempo (€/ min).

Q: capacidad del vehículo en kg.

LxW: superficie del vehiculo.

M: vehículos para realizar las rutas.

TS: tiempo necesario para realizar una operación {recogida, entrega}.

F: número de pedidos u órdenes.

N: número de nodos, será igual a 2F.

LD: limite del tiempo de disco.

LC: limite del tiempo de conducción.

DD: tiempo de descanso por superar LD.

DC: tiempo de descanso por superar LC.

V: velocidad (km/ h).

4.2.2) Variables

R_k : ruta k correspondiente al vehículo k $\forall k \in [1, M]$.

d_{ij} : distancia entre el nodo i y el nodo j $\forall i, j \in N$.

t_{ij} : tiempo entre el nodo i y el nodo j, será d_{ij} / V , $\forall i, j \in N$.

x_{ij}^k : el vehículo k va del nodo i al nodo j.

p_i : peso del pedido i $\forall i \in F$.

d_i^k : instante en que el vehículo k abandona el nodo i, $\forall i \in N$ y $\forall k \in [1, M]$

s_i^k : instante de servicio o llegada del nodo i por el vehículo k . $\forall i \in N$ y $\forall k \in [1, M]$

s_{do}^k : instante de inicio de disco del vehículo k $\forall k \in [1, M]$. Inicialmente será la del origen del primer pedido y se actualizará con la hora de servicio del último nodo antes de hacer el descanso DD cuando se ha excedido LD.

s_{co}^k : instante de inicio o de conducción del vehículo k $\forall k \in [1, M]$. Inicialmente será la del origen del primer pedido y se actualizará con la hora de servicio del último nodo antes de hacer el descanso DC cuando se ha excedido LC.

α = ítems (P_i), contiene el conjunto de ítems del pedido P_i con sus dimensiones y capacidad.

$l_{ih}x_{wh}$: superficie del ítem h perteneciente al nodo i $\forall i \in N$ y $\forall h \in \alpha$.

4.3) Función objetivo

Minimizar la función de costes.

$$\min \left(\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{k=1}^M T \times d_{ij} \times x_{ij}^k + N \times O + \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{k=1}^M (a_j - s_{jk}^{(*1)}) \times x_{ij}^k \times B \right)$$

Donde:

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{k=1}^M T \cdot d_{ij} \cdot x_{ij}^k, \quad \text{coste desplazamiento del nodo } i \text{ a } j \text{ por el vehiculo } k.$$

$$N \times O, \quad \text{coste del total de las operaciones.}$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{k=1}^M (a_j - s_{jk}^{(*1)}) \times x_{ij}^k \times B \quad \text{penalización por llegar antes de inicio de ventana temporal.}$$

Sujeta a:

$$\sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij}^k = 1, \quad \forall i, j \in N, \forall k \in M \quad (6)$$

En (6) se asegura que un solo vehículo sirve el pedido.

4.4) Restricciones

Restricción de capacidad:

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N p_i x_{ij}^k \leq Q, \quad \forall k \in [1, M] \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \left(\sum_{h=0}^{\alpha} (l_{ih} \times w_{ih}) \right) x_{ij}^k \leq L \times W, \quad \forall k \in [1, M], \alpha = \text{items}(X_i) \quad (8)$$

En (7) se atestigua que el peso de los pedidos insertados en el vehículo k no supera la masa máxima autorizada Q; en (8) se verifica que la suma de la superficie de los ítems de todos los pedidos de un vehículo k, no sobrepasa la superficie disponible del vehículo LxW.

Restricciones temporales:

$$s_i \leq b_i, \quad \forall i \in N \quad (9)$$

$$d_i - (s_i + w1_i + TS + \max(TD, TC)^k) \geq 0, \quad \forall i \in N, \quad \forall k \in M \quad (10)$$

$$a_i \leq s_i, \quad \forall i \in N \quad (11)$$

$$s_i \leq a_i, \quad \forall i \in N \quad (12)$$

En (9) se asegura que el momento de llegada al nodo i es anterior al fin de su ventana temporal; en (10) que la salida del punto i se produce después de: haber llegado, realizado el servicio, la espera en caso de producirse y el descanso oportuno en caso de haber superado uno de los límites temporales, de conducción o de disco; en (11) que se debe llegar después del inicio de la ventana temporal, sin embargo, se permite llegar antes (12), aunque implicando una penalización que se representa en la función de costes a minimizar.

A su vez las variables de las expresiones (9), (10), (11) y (12) deben satisfacer las siguientes restricciones, donde $w1_i$ es el tiempo de espera al inicio de la ventana temporal del punto i; por otro lado, se define s_{c0}^k y s_{d0}^k como instante de reset de contador del tiempo de conducción y tiempo de disco.

$$s_j = d_i + t_{i,j} \quad \text{si } x_{ij}^k = 1, \quad \forall i, j \in N, \quad \forall k \in M \quad (13)$$

$$w1_i = \max\{0, (a_i - s_i)\}, \quad \forall i \in N \quad (14)$$

$$\max(TD, TC)^k = \begin{cases} 0, & \text{si } (s_i - s_{c0}^k < LC) \vee (s_i - s_{d0}^k < LD) \\ TD, & \text{si } (s_i - s_{c0}^k < LC) \vee (s_i - s_{d0}^k \geq LD) \\ TC, & \text{si } (s_i - s_{c0}^k \geq LC) \vee (s_i - s_{d0}^k < LD) \\ \max(TC, TD), & \text{si } (s_i - s_{c0}^k \geq LC) \vee (s_i - s_{d0}^k \geq LD) \end{cases}, \forall i \in N, \forall k \in M \quad (15)$$

$$s_{c0}^k = \begin{cases} d_1, & \text{si } i=1 \\ d_i, & \text{si } (s_i - s_{c0}^k \geq LC) \\ s_{c0}^k, & \text{si } (s_i - s_{c0}^k < LC) \end{cases}, \quad \forall i \in N, \forall k \in M \quad (16)$$

$$s_{d0}^k = \begin{cases} d_1, & \text{si } i=1 \\ d_i, & \text{si } (s_i - s_{c0}^k \geq LD) \\ s_{d0}^k, & \text{si } (s_i - s_{c0}^k < LD) \end{cases}, \quad \forall i \in N, \forall k \in M \quad (17)$$

Con (13) se define la hora de llegada a un punto s_j , en (14) el tiempo de espera w_{1i} y con (15) el tiempo de descanso a realizar en ese punto por el vehículo k , es decir, $\max(TD, TC)^k$, que aparecen en (11).

Gracias a (16) y (17) se determina el valor de la hora de inicio de puesta a cero del contador de tiempo de conducción s_{c0}^k y la hora de inicio de puesta a cero del contador que controla el tiempo de disco s_{d0}^k del vehículo k respectivamente.

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{si el arco } (i, j) \text{ es recorrido por el vehículo } k. \\ 0, & \text{en cualquier otro caso.} \end{cases} \quad \forall i, j \in N, \forall k \in [1, M] \quad (18)$$

Gracias a (18), se determina si un vehículo k sirve al punto j tras el punto i .

5) Conclusiones

La planificación y gestión del transporte de mercancías es un tema que despierta un gran interés, debido en gran medida a que es un paso común en la cadena de suministro para todo tipo de bienes, ya sean de primera necesidad, de lujo, etc. que incrementa el coste de los mismos pero no aumenta su valor de utilidad. Esto, junto al hecho de que en la actualidad se premia la inmediatez, de forma que el intervalo temporal entre la realización de un pedido y la disposición del mismo es cada vez menor. Por otro lado, una de las grandes preocupaciones de hoy en día es el consumo energético y la contaminación. Estos motivos, además de los económicos, son los que han llevado a muchos investigadores a promover estudios con el objetivo de reducir el número de vehículos empleados, los kilómetros recorridos, introducir el mayor número de paquetes.... Es decir, a dirigir sus esfuerzos hacia la optimización del transporte, consiguiendo reducir los costes, el consumo de combustible y la contaminación.

Gracias a este TFM he iniciado el camino para la realización de lo que será mi futura tesis doctoral, ya que me ha sido de gran utilidad para comprender el complejo campo de la planificación y optimización de rutas en el transporte de mercancías. Además, he adquirido los conocimientos para entender e interpretar el estado del arte y poder aplicarlos a un escenario concreto. En esta labor, lo más complejo es diseñar la función objetivo y las restricciones a las

que esta se ajusta con la terminología utilizada en este tipo de problemas; otra de las dificultades es encontrar la técnica metaheurística que mejor se adapta a los requisitos del problema debido a la cantidad de métodos y soluciones propuestas.

Con el trabajo realizado se podrá generar una herramienta basada en el método propuesto, que satisfaga la función objetivo y restricciones y sea aplicada a un caso real para determinar la calidad del estudio. Este paso, no se ha incluido en el trabajo ya que no entraba dentro de los objetivos planteados y debido a que se trataría de un trabajo de programación más acorde a un proyecto de ingeniería informática.

Referencias Bibliográficas:

[1] Estudio y descripción del problema:

Francisco Aparicio Izquierdo: *INGENIERÍA DEL TRANSPORTE*, Editoriales Dossat, 2008

Juan de Dios Ortúzar: *MODELOS DE TRANSPORTE*, Universidad de Cantabria, 2008

[2] Estado del arte:

Emmanouil E. Zachariadis, Christos D. Tarantilis, Christos T. Kiranoudis: *A GUIDED TABÚ SEARCH FOR THE VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH TWO DIMENSIONAL LOADING CONSTRAINTS*, European Journal of Operational research, 2007

L. Barcos, V. Rodríguez, M. J. Álvarez, F. Robusté: *ROUTING DESIGN FOR LESS THAN TRUCKLOAD MOTOR CARRIERS USING ANT COLONY OPTIMIZATION*, Transportation Research Part E available at ScienceDirect, 2009

David Escuin Finol: *DESARROLLO DE UN ALGORITMO BASADO EN TECNICAS HEURISTICAS PARA LA RESOLUCION DE PROBLEMAS DE GESTION DE TRANSPORTE*, Universidad de Zaragoza, 2010

Francisco Baptista Pereira, Jorge Tavares: *BIO INSPIRED ALGORITHMS FOR THE VEHICLE ROUTING PROBLEM*, Springer, 2009

Mitsuo Gen, Runwei Cheng: *GENETIC ALGORITHMS AND ENGINEERING OPTIMIZATION*, John Wiley and sons, 2000

[3] Anexo NP-Completo:

<http://www.uv.es/jkliment/Documentos/TeoComp.pc.pdf>

<http://www.ucm.es/info/pslogica/automatas.pdf>

[4] Anexo VRP:

<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/1492/149212815002.pdf>

<http://www.liacs.nl/assets/Masterscripties/2010-01FrankTakes.pdf>

<http://neo.lcc.uma.es/radi-aeb/WebVRP/>

[5] Anexo BPP:

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmnf/bonilla_g_le/capitulo2.pdf

<http://www.mecalux.es/navigation/event/Detailinterview.do?idinterview=28623096>

[6] Anexo Metaheurísticas:

<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/1492/149212815002.pdf>

www.ayc.unavarra.es/orduna/LIA/Teoria/juegos.ppt

<http://www.iiia.csic.es/~pedro/busqueda1-introduccion.pdf>

<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/1492/149212815002.pdf>

[7] Anexo colonia de hormigas:

Francisco Baptista Pereira, Jorge Tavares: *BIO INSPIRED ALGORITHMS FOR THE VEHICLE ROUTING PROBLEM*, Springer, 2009.