

Trabajo de Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Optimización del acarreo terrestre considerando  
vehículos con capacidad de carga de varios  
contenedores

Autor: Teresa Grandes Núñez

Tutor: Alejandro Escudero Santana

**Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas II**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019





Trabajo de Fin de Máster  
Ingeniería Industrial

# **Optimización del acarreo terrestre considerando vehículos con capacidad de carga de varios contenedores**

Autor:

Teresa Grandes Núñez

Tutor:

Alejandro Escudero Santana

Profesor Contratado Doctor

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas II

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo de Fin de Máster: Optimización del acarreo terrestre considerando vehículos con capacidad de carga de varios contenedores

Autor: Teresa Grandes Núñez

Tutor: Alejandro Escudero Santana

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mis maestros*

# Resumen

---

Este Trabajo de Fin de Máster trata de resolver un problema de acarreo terrestre considerando vehículos con capacidad de carga de varios contenedores mediante la aplicación del algoritmo tabú y el recocido simulado. El problema aborda tanto el transporte de contenedores de diferentes dimensiones como el manejo de los contenedores vacíos. Además, este se plantea desde tres perspectivas diferentes, en la primera cada camión puede transportar únicamente un contenedor. La segunda versión, permite el acarreo de varios contenedores limitados por su tamaño y la última, añade a esta un límite de carga de peso por camión. Así pues, se analiza el comportamiento de cada una de las perspectivas en función de su modelado y se compara la eficiencia de la búsqueda tabú frente al método del recocido simulado.

# Abstract

---

This aims to solve drayage optimization with multi-size containers problem throughout the taboo algorithm and simulated annealing. The problem addresses both the transport of containers of different dimensions and the handling of empty containers. In addition, this is approached from three different perspectives, in the first one each truck can transport only one container. The second version allows the transport of several containers limited by their size and the last one adds to this a weight limit per truck. Thus, the behavior of each perspective is analyzed according to its modeling and the efficiency of the taboo search is compared with the simulated annealing method.

<b>Resumen</b>	<b>vi</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Índice</b>	<b>viii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>x</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xii</b>
<b>Notación</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introducción y objetivos del trabajo</b>	<b>11</b>
1.1 <i>Objetivos</i>	11
1.2 <i>Estructura del trabajo</i>	11
<b>2 Antecedentes</b>	<b>13</b>
2.1 <i>Transporte de mercancías</i>	13
2.1.1 <i>Medios de transportes</i>	13
2.2 <i>Transporte intermodal</i>	14
2.3 <i>El acarreo terrestre</i>	15
2.3.1 <i>Operaciones de acarreo</i>	16
<b>3 El problema de acarreo terrestre con varios tamaños de contenedores</b>	<b>19</b>
3.1 <i>Definición</i>	19
3.1.1 <i>El problema MSCTT</i>	19
3.2 <i>Estado del arte</i>	22
3.3.1 <i>“Pick-up and delivery problems”</i>	23
3.3.2 <i>Pedidos flexibles</i>	23
3.3.3 <i>Contenedores multi-size</i>	24
3.4 <i>Formulación</i>	24
3.4.1 <i>Formulación basada en la transición del estado</i>	24
3.4.2 <i>Inicialización del problema</i>	26
3.4.3 <i>Versión 1: Cada camión solo puede llevar un contenedor</i>	28
3.4.4 <i>Versión 2: Cada camión puede llevar varios contenedores, limitado solo por el tamaño de los mismos.</i>	31
3.4.5 <i>Versión 3: Cada camión puede llevar varios contenedores, limitado por tamaño y peso.</i>	38
<b>4 Metodología de resolución</b>	<b>40</b>
4.1 <i>Los métodos de resolución de problemas de transporte</i>	40
4.1.1 <i>Métodos exactos</i>	40
4.1.2 <i>Métodos aproximados</i>	41
4.2 <i>La Búsqueda Tabú</i>	46
4.2.1 <i>Fundamentos</i>	47
4.2.2 <i>Estructura de la búsqueda tabú</i>	48
4.2.3 <i>Metodología de la Búsqueda Tabú</i>	52
4.3 <i>Recocido simulado</i>	52
4.3.1 <i>Analogía</i>	53
4.3.2 <i>Algoritmo básico</i>	54



4.4	<i>Adaptación de los métodos al problema</i>	55
4.4.1	<i>Adaptación de la Búsqueda Tabú</i>	55
4.4.2	<i>Adaptación del Recocido Simulado</i>	63
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>65</b>
5.1	<i>Definición de la experimentación</i>	65
5.2	<i>Calibrado de los métodos</i>	65
5.2.1	<i>Calibrado de la Búsqueda Tabú</i>	65
5.2.2	<i>Calibrado del Recocido Simulado</i>	72
5.3	<i>Resultados de la búsqueda tabú</i>	77
5.4	<i>Resultados del recocido simulado</i>	79
5.5	<i>Comparación de resultados</i>	81
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>83</b>
6.1	<i>Principales logros alcanzados</i>	83
6.2	<i>Líneas de futuro</i>	83
	<b>Referencias</b>	<b>85</b>
	<b>Glosario</b>	<b>89</b>
	<b>Anexo</b>	<b>90</b>

# Índice de Tablas

---

Tabla 1: Conjunto de operaciones posibles en las operaciones de acarreo terrestre. Fuente: Escudero-Santana (2013)	18
Tabla 2: Tipo de contenedores y posibles localizaciones	25
Tabla 3: Nomenclatura de la localización de los clientes	27
Tabla 4: Posición en la matriz según el tipo de orden	27
Tabla 5: Posibles estados de los camiones en la versión 1	29
Tabla 6: Posibles escenarios con órdenes de llegada completas	29
Tabla 7: Posibles escenarios con órdenes de salida completas	30
Tabla 8: Posibles escenarios con órdenes de llegada vacías	31
Tabla 9: Posibles estados de los camiones en la versión 2	32
Tabla 10: Posibles escenarios de recogida y entrega de órdenes de llegada completas de 20 pies	33
Tabla 11: Posibles escenarios de recogida y entrega de órdenes de salida completas de 20 pies	34
Tabla 12: Posibles escenarios de recogida y entrega de órdenes de llegada vacías de 20 pies	35
Tabla 13: Variables locales del subprograma de asignación de las órdenes de 20 pies	36
Tabla 14: Metodología de la fase inicial	36
Tabla 15: Metodología de asignación de órdenes de 20 pies cuando $S = 2$ y $C = 0$	37
Tabla 16: Metodología de asignación de órdenes de 20 pies cuando $S = 1$ y $C = 1$	37
Tabla 17: Metodología de asignación de órdenes de 20 pies cuando $S = 1$ y $C = 0$	38
Tabla 18: Capacidad máxima por contenedor	38
Tabla 19: Posibles escenarios a la hora de combinar dos contenedores de 20 pies limitado por el peso	39
Tabla 20: Analogía entre la termodinámica y optimización	54
Tabla 21: Ejemplo de una solución $x$ a lo largo de una exploración por búsqueda tabú	57
Tabla 22: Ejemplo de permutaciones posibles dentro de un mismo camión	57
Tabla 23: Ejemplos de permutaciones entre un par de camiones	58
Tabla 24: Ejemplos de reubicaciones de órdenes en huecos libres	59
Tabla 25: Tipo de permutaciones consideradas según la variable permuta	61
Tabla 26: Parámetros asignados en la búsqueda tabú y valor de la función objetivo de cada escenario	66
Tabla 27: Valor de la función objetivo en cada uno de los escenarios planteados	66
Tabla 28: Calibrado de la longitud de la lista tabú <i>longtabu</i>	68
Tabla 29: Parámetros fijos durante el calibrado <i>longtabu</i>	68
Tabla 30: Calibrado del número de filas de la tabla de permutación <i>Nfilas</i>	69

Tabla 31: Parámetros fijados en el calibrado de <i>Nfilas</i>	69
Tabla 32: Calibrado del factor de penalización de frecuencia <i>penalfrec</i>	69
Tabla 33: Parámetros fijados en el calibrado <i>penalfrec</i>	70
Tabla 34: Calibrado del umbral de frecuencia <i>umbralfrec</i>	70
Tabla 35: Parámetros fijados en la calibración de <i>umbralfrec</i>	71
Tabla 36: Calibrado del número de iteraciones <i>niter</i>	71
Tabla 37: Parámetros fijados durante el calibrado de <i>niter</i>	72
Tabla 38: Parámetros del TS resultantes del proceso de calibrado	72
Tabla 39: Calibrado de la temperatura inicial $T_0$	73
Tabla 40: Parámetros fijados durante el calibrado $T_0$	73
Tabla 41: Calibrado del coeficiente de velocidad de enfriamiento $\alpha$	74
Tabla 42: Parámetros fijados durante el calibrado de $\alpha$	74
Tabla 43: Calibrado de la longitud de la cadena $L$	75
Tabla 44: Parámetros fijados durante el calibrado de $L$	75
Tabla 45: Calibrado de la temperatura final $T_f$	76
Tabla 46: Parámetros fijados durante el calibrado de $T_f$	76
Tabla 47: Calibrado de la máxima iteración <i>Maxiter</i>	77
Tabla 48: Parámetros fijados durante el calibrado de <i>Maxiter</i>	77
Tabla 49: Parámetros del SA resultantes del proceso de calibrado	77
Tabla 50: Resultados alcanzados mediante la búsqueda tabú	78
Tabla 51: Resultados alcanzados mediante el método de recocido simulado	80
Tabla 52: Resultados alcanzados para un tiempo fijo de 3000 s	82
Tabla 53: Tipos de pedidos solicitados por cada cliente	90
Tabla 54: Tiempo entre las distintas localizaciones en minutos	92
Tabla 55: Peso en toneladas de los contenedores de las órdenes asignadas	108

# Índice de Figuras

---

Figura 1: Movimientos posibles dentro del acarreo terrestre. Fuente: Escudero-Santana (2013)	16
Figura 2: Estado de los camiones en función de la carga transportada. Fuente: Escudero-Santana(2013)	17
Figura 3: Orden de entrada completo	20
Figura 4: Orden de salida completa	21
Figura 5: Orden de contenedores vacíos de llegada	21
Figura 6: Ejemplo de un pedido de contenedor de llegada completo	25
Figura 7: Órdenes diferentes partiendo del mismo estado inicial	26
Figura 8: Esquema de la formulación de las soluciones obtenidas	28
Figura 9: Metodología a emplear según la codificación de la orden	32
Figura 10: Ejemplo de árbol Branch and Bound. Fuente: Capelle et al. (2012)	41
Figura 11: Combinación de dos rutas difentes en una sola. Fuente: Olivera (2004)	42
Figura 12: Ejemplo del cromosoma GVR	45
Figura 13: Algoritmo de la búsqueda tabú simple	52
Figura 14: Algoritmo Recocido Simulado	55
Figura 15: Estructura de memoria basada en atributos	60
Figura 16: Índices de posición en una solución	60
Figura 17 : Metodología de almacenamiento de atributos en la lista tabú	62
Figura 18: Condición de aceptación de una solución vecina	64
Figura 19: Comparativa entre estrategias de búsqueda basadas en lo reciente y en lo frecuente	67
Figura 20: Soluciones obtenidas durante la búsqueda tabú en la versión 1 del problema	78
Figura 21: Soluciones obtenidas durante la búsqueda tabú en la versión 2 del problema	79
Figura 22: Soluciones obtenidas durante la búsqueda tabú en la versión 3 del problema	79
Figura 23: Soluciones obtenidas durante el recocido simulado en la versión 1 del problema	80
Figura 24: Soluciones obtenidas durante el recocido simulado en la versión 2 del problema	81
Figura 25: Soluciones obtenidas durante el recocido simulado en la versión 3 del problema	81

# Notación

---

$e$	número e
s.a.	Sujeto a
:	Tal que
$\leq$	Menor o igual
$\geq$	Mayor o igual
$\in$	Perteneiente a un conjunto
$\subseteq$	Es subconjunto de



# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO

---

Acorde con el informe del Observatorio del Transporte y la Logística en España del Ministerio de Fomento (2015):

“El concepto actual de logística surge como necesidad de la industria para dar respuesta a un mercado orientado a satisfacer las necesidades de una demanda cada vez más exigente y que dispone de un número más elevado de competidores en todo el mundo como consecuencia de la globalización del comercio”

Por tanto, en un mundo globalizado marcado por la competencia, el manejo de las cadenas de suministro adquiere un papel primordial para la competitividad de cualquier empresa. Las actividades logísticas se ven influenciadas por diversos factores que marcan su progreso. El auge desmesurado del comercio electrónico, la llegada de nuevos modelos de consumo, el interés por el impacto medioambiental o la transformación digital condicionarán dichas actividades logísticas.

Según el Estudio de caracterización del sector de transporte y la logística en España publicado en el 2016, el total de los costes logísticos para las industrias españolas computa alrededor de un 6.5% de su volumen de negocio. De dicha cifra, un 60 % conciernen a costes de transporte mientras el tanto por ciento restantes recae sobre costes de gestión de almacenes.

Dentro del área del transporte de mercancías, el transporte de contenedores por camión es un tema de vital importancia en la logística moderna de contenedores en todo el mundo. Por un lado, el transporte en camión es esencial en la logística de unidades de carga, ya que este tipo de transporte puede prestar servicios puerta a puerta, mientras que los buques y los trenes generalmente no pueden llevarlo a cabo. Sin embargo, tal como expone Cheung et al. (2018), el coste de transporte por contenedor por milla es relativamente alto. Además de ser una fuente importante de retrasos de envíos, congestiones en la carreteras y emisiones de gases de efecto invernadero. En consecuencia, cualquier mejora en este ámbito supone un ahorro considerable de dinero y a la vez, de tiempo. Este es el fin de este proyecto, proporcionar una ruta que minimice el tiempo de acarreo de los camiones, cumpliendo con la entrega total de las órdenes solicitadas por los clientes.

El problema a tratar se estudiará desde diferentes perspectivas, donde en cada una de ellas se aportará una limitación concreta a la hora de transportar los contenedores. Para obtener las soluciones a cada escenario planteado se implementará dos métodos metaheurísticos, concretamente la *Búsqueda Tabú* o *Taboo Search* y el *Recocido Simulado* o *Simulated Annealing*.

## 1.1 Objetivos

Con este proyecto se busca la minimización del tiempo total dedicado al acarreo de contenedores mediante el uso de herramientas de optimización de rutas. En concreto, se considera un problema de acarreo terrestre con contenedores de 20 y 40 pies, al que se le incorporará limitaciones de peso y tamaño propias del comercio actual por carretera.

Además la minimización de tiempos conllevará a su vez la disminución de costes de transporte, reduciendo la flota de camiones dedicada a la entrega de las ordenes asignadas y la gasolina empleada para ello, aminorando a su vez el impacto medio ambiental de esta modalidad de transporte. Por consiguiente, se mejorará la calidad del servicio al cliente y la diferenciación dentro del mercado donde compiten.

## 1.2 Estructura del trabajo

A lo largo de este proyecto se ha aplicado el algoritmo tabú y el recocido simulado para la optimización del acarreo terrestre con varios tamaños de contenedores con capacidad de carga. En primer lugar, se ha abordado el transporte de mercancías y las distintas modalidades de este según el medio empleado. Seguidamente se analiza el transporte intermodal como medio articulación entre diferentes modos de transporte, para concluir con una de las fases que la componen, el denominado Acarreo Terrestre. El cual será el objeto de estudio en este

trabajo.

Acto seguido, se procede a la formulación del problema de acarreo. Este se contemplará desde tres perspectivas diferentes. En la primera versión, cada camión podrá solo transportar un solo contenedor. A continuación, en la segunda variante se permite el acarreo de varios contenedores, pero se verá limitado por el tamaño de estos al no poder exceder los 40 pies de largo. Y por último se incorpora además de la limitación del tamaño, la condición de no sobrepasar un peso máximo de carga por camión.

Una vez estudiadas las distintas alternativas que se van a abordar, se expone los diferentes métodos de resolución para el problema del transporte. Ahondando en la búsqueda tabú y el recocido simulado, métodos adoptados para la resolución del problema planteado. En ambos métodos previamente se estudiará los parámetros empleados en cada uno de ellos con su correspondiente calibrado y se tomará como lenguaje de programación Python.

Finalmente se concluirá analizando la eficiencia de cada uno de los métodos empleados.



# 2 ANTECEDENTES

## 2.1 Transporte de mercancías

“El concepto de transporte se emplea para describir el acto y consecuencia de trasladar algo de un lugar a otro. De la misma forma, permite nombrar a aquellos artilugios o vehículos que contribuyen a tal efecto, movilizándolo individuos o mercancías desde un determinado sitio hasta otro” (Pérez y Gardey, 2010).

Así pues, es evidente que el transporte forme parte de la logística, la cual está integrada por el conjunto de medios y métodos que posibilitan la organización de un servicio o una empresa. Dentro del mundo del comercio, la logística está asociada a la disposición de bienes en el lugar conciso, momento apropiado y bajo unas condiciones determinadas. De este modo, el transporte de mercancías se encuentra dentro de ella.

En la actualidad, las grandes organizaciones se esfuerzan por contar con un buen sistema de transporte, estrategia que permite la diferenciación en el mercado donde compiten y cuya finalidad es asegurar el suministro pertinente de sus insumos, así como la entrega en el tiempo y lugar solicitado previamente por sus clientes.

El tráfico de mercancías está definido por una serie de actividades que engloban los siguientes factores:

- Planificación y gestión de inventarios
- Almacenamiento y protección de la materia prima
- Transporte y manejo de materiales
- Comunicación apropiada para una administración eficaz

Cada industria requerirá un tipo de sistema de transporte, teniendo en cuenta en su elección factores tales como la relación entre el valor del producto y el coste de transporte, la localización geográfica o la obsolescencia del producto entre otros. De forma que se hace inevitable una selección exhausta del sistema de transporte competente donde se abordará necesidades como la urgencia, la cantidad o el destino de la carga que se va a entregar. Además, habrá que tener presente las prestaciones ofrecidas por cada tipo de transporte, como el estado de la ruta o, costes y recursos de los que se dispone.

### 2.1.1 Medios de transportes

En relación con la forma física del transporte que se emplea, el transporte de mercancías se dividirá por tierra, mar y aire. No obstante, dentro de esta primera clasificación, pueden encontrarse distintos subgrupos, como por ejemplo desplazarse por carretera o en tren como transportes de tierra, o usar un contenedor entero o solo un palé en el caso del transporte marítimo. A continuación, se muestra los principales medios empleados:

#### 2.1.1.1 Transporte por tierra

En esta división se incluye todo aquel transporte que tiene lugar en suelo firme, es decir, por tierra. En concreto, se puede realizar por carretera y por ferrocarril, en otras palabras, en camión, turismo o tren. En cuanto a las prestaciones de cada uno, cabe destacar que generalmente los camiones son más rápidos, pero a su vez más caros, agravándose los costes en largas distancias. Por consiguiente, los trenes se posicionan en el medio de transporte más manejado para distancias mayores a 1000 kilómetros.

En la actualidad, el transporte ferroviario se considera un sistema intermodal que, excepto situaciones muy explícitas, necesita de la carretera. Los trasbordos de la carga suponen unos costes de fricción elevados, de hecho pueden representar entre el 25 % y 40% del gasto ferroviario total. Esto último provoca que el ferrocarril apenas se emplee en un 5.2% de las mercancías según datos de Eurostat correspondientes al año 2014. En resumidas cuentas, el camión le sigue llevando una amplia ventaja al tren debido en gran parte a su flexibilidad.

Con respecto a la carga transportada, se hace una diferencia entre carga dispersa y carga completa. La primera está distribuida en uno o más palés en un camión o vagón de tren, así pues, comparte en principio los costes de transporte con otras compañías que también disponen de un espacio. De modo que si la mercancía que se pretende desplazar ocupa menos de un contenedor, conviene optar por este tipo de carga para no incurrir en gasto innecesarios. En cambio, está el término de carga completa, referido al alquiler por parte del comprador

de transporte de un camión o vagón completo.

### 2.1.1.2 Transporte marítimo

En primer lugar, hay que recalcar que este tipo de transporte es el modo más empleado para el comercio internacional dentro del ámbito mundial. Por tanto, es el que sustenta mayor movimiento de mercancías, tanto en contenedor como a granel ya sea líquido o seco. De hecho, es uno de los soportes de la economía global ya que alrededor del 80% de todas las mercancías distribuidas por todo el mundo son transportadas mediante el medio marítimo de acuerdo con la Conferencia de las Naciones Unidas sobre comercio y desarrollo en el 2015.

Además, goza de características propias que lo hace idílico no solo para el transporte de maquinarias, automóviles y de grandes cantidades de mercaderías, sino también para el traslado de ciertos productos que de otro modo sería imposible llevar a cabo su distribución como es el caso del petróleo.

La incidencia de costos de transporte se ve minimizada en comparación con el medio aéreo o terrestre, cuyos volúmenes permitidos son menores. Esto es motivado por las grandes capacidades de transporte de masas y de contenedores que poseen los buques modernos.

En el transporte marítimo se diferencia las mercancías transportadas entre granel y contenedor. El primero se coloca directamente en el navío sin ningún tipo de embalaje, el cual es común en transporte de materias primas por ejemplo cereales, petróleo o carbón. En este caso los transportistas no trabajan con horario fijo, sino prestan un servicio irregular funcionando como los “taxistas del mar”; se les alquila para realizar viajes concretos para un cliente específico.

En contraste con el transporte de granel, se encuentra los contenedores. Los barcos que los transportan navegan con horarios fijos, considerados como “los autobuses del mar”, debido a que hacen escala en el mismo puerto el mismo día de cada semana. Una de las grandes ventajas de este modo de transporte es que un contenedor puede transbordarse de barco en barco o incluso de barco a camión, esto permite poder trasladar mercancías de menor volumen de forma más eficiente.

### 2.1.1.3 Transporte aéreo

Con respecto a este medio de transporte, es el más reciente cuya característica principal radica en su rapidez. Además, por otro lado, las barreras físicas no afectan a su transporte a diferencia de otros medios como el tren, donde estas barreras son determinantes a la hora de llevar a cabo el traslado de mercancías.

Por consiguiente, el empleo de aviones de carga para mercancías va creciendo con los años y es su rapidez la que justifica el mayor coste; aun así, todavía juega un papel secundario.

Su auge es causado por el uso de Internet y del comercio electrónico. Cada vez más el cliente demanda pedidos de grandes distancias y quieren disponer de estos lo más rápido posible. Esto último provoca que una de las ventajas competitivas que ofrecen las empresas sea la rapidez de entrega y posibilidad de transportar sus pedidos a cualquier parte del mundo. Siendo estos uno de los motivos por los que incurren en este tipo de transporte.

## 2.2 Transporte intermodal

El transporte intermodal, dentro del transporte de mercancías, abarca el movimiento de unidades de carga mediante distintos medios combinados.

Según el Ministerio de Fomento el término “intermodalidad” se emplea para describir un sistema de transporte en el cual dos o más modos de transportes intervienen en el envío de mercancías de manera íntegra, sin procesos de carga y descarga, en una cadena de transporte puerta a puerta .

En dicha modalidad se emplea una única medida de carga, cuya finalidad es operar el traspaso de mercancías lo más rápido y eficaz posible. Al mismo tiempo se reduce los posibles daños que puedan sufrir durante su manipulación, evitando así la ruptura de carga.

Por consiguiente, se emplearán los medios de transportes citados en el apartado anterior, donde cualquier combinación de estos constituiría un tipo de transporte intermodal. La cooperación entre los diferentes medios

de transporte implicados será clave para la cadena logística internacional.

En cuanto a las ventajas que ofrece esta modalidad, se encuentra la reducción de los plazos de transporte, empleando la combinación que sea más veloz en cada situación y de igual modo se reduce en costes, estableciendo la articulación más económica. Dependiendo de la situación del interesado, se le dará más prioridad a un aspecto que a otro y el precio final dependerá de este tipo de decisiones.

Por otro lado, es notable la disminución de los tiempos de carga y descarga, se llega a reducir un 70% del tiempo empleado, también minimizando el número de estibadores. Además, desde el punto de vista del que solicita el servicio, resulta más cómodo tratar solo con un único porteador, el cual tramitará la operativa de transporte en los diversos modos e igualmente el exportador conoce previamente el total del precio de traslado en diversas operaciones puerta a puerta. Hay que recalcar que en el transporte intermodal se produce una simplificación del papeleo donde en vez de hacer la suma de la documentación cada modalidad se unifica en una sola.

Para concluir con las prestaciones que ofrece el transporte intermodal, cabe destacar la reducción de controles gracias al precintado de las unidades de carga. De ahí la disminución de la tasa de robos y de los daños que conllevan al abaratamiento de las primas de seguro.

No obstante, aparecen ciertos inconvenientes con su uso, por ejemplo, la falta de confiabilidad causada por su dependencia a más de un medio de transporte. En otras palabras, a medida que aumenta el número de medios de transporte implicados en el traslado de la mercancía, la posibilidad de fallo en algún elemento de esta cadena evidentemente también aumenta. De ahí que aquellos clientes que requieran de un transporte confiable no tiendan a contratar los servicios prestados por los sistemas intermodales.

Como bien se ha dicho antes, el transporte intermodal reducía la tasa de daños. Sin embargo, esto implica un gasto adicional en embalajes excesivos y material de protección para reforzar la carga, este peso y costes adicionales contrarrestan ciertas ventajas ofrecidas por este medio.

Por último, este tipo de transporte sufre altos costos de infraestructura. Los transportistas requieren el empleo de grúas pesadas y equipo necesario para manejar los grandes contenedores. Indiscutiblemente este tipo de infraestructuras no están presentes en todos los emplazamientos, como es el caso de los países en vía de desarrollo.

## **2.3 El acarreo terrestre**

El acarreo o drayage conforma el conjunto de movimientos pertenecientes al transporte intermodal cuyo modo de transporte empleado es la carretera y comprende las operaciones necesarias para enlazar las terminales intermodales con los orígenes y destinos de las mercancías (Escudero Santana, 2013). Debido a esto, en el acarreo tiene lugar la recogida y entrega de la unidad de carga, de ahí que se le asocie distancias reducidas.

Actualmente, las deficiencias en las infraestructuras y explotación de los recursos estimulan que en esta etapa sea imprescindible para llevar a cabo el transporte de mercancías. De este modo, es necesario del acarreo para cualquier tipo de transporte como el barco o el tren.

Al mismo tiempo constituye la etapa más flexible del transporte intermodal, así pues, es un punto de gran relevancia dónde es interesante reducir costes, considerando que los acarreos generan unos sobrecostes considerables al sistema modal de transportes. Estos gastos por lo general son asumidos por el último eslabón de la cadena logística, que corresponde con el cliente final. Hay que recalcar la importancia de estos importes generados, ya que el acarreo terrestre contribuye al 40% del coste total del transporte intermodal de mercancías.

Dicho de otra manera, viendo los costes asociados a esta etapa sería de gran interés focalizar nuestra atención en la mejora de la eficiencia del acarreo terrestre, permitiendo así una reducción notable en los costos generados en la cadena de transporte y una disminución de las distancias. Como consecuencia de esto, los aspectos comentados supondrían una mayor competitividad en el mercado intermodal.

En cuanto al manejo de contenedores, acorde a Vidovic et al. (2011) la mayoría de los contenedores se dimensionan acorde a la Organización Internacional de Estándares, más conocida por sus siglas en inglés ISO, facilitando así su manipulación. Según esta, la longitud de los contenedores podría ser 10, 20,30 ,40 y 45 ft, además recientemente se incorporaron las dimensiones de 48 o 53 ft. Sin embargo, los rangos más usados en casi todo el mundo son los contenedores de 20 o 40 ft. De este modo, en un principio Asia y Europa exceptuando

a Finlandia y Suecia, solo podrían ser usados exclusivamente las unidades de carga de 20 y 40 ft a lo referido al transporte de contenedores por carretera según se recoge en varios estudios (Popović et al., 2012 ; Vidović et al., 2011).

Sin embargo, recientemente se aprobó una nueva medida mediante el Real Decreto 2822/1998 de 23 de diciembre que aprueba el acarreo de contenedores de 45 pies bajo estas condiciones:

“Las operaciones de transporte destinadas al transporte de uno o varios contenedores o cajas móviles, con una longitud máxima total de hasta 45 pies, que recurran al transporte por la vía navegable o un recorrido marítimo, siempre que el tramo por carretera inicial o final no exceda de 150 km en el territorio de la Unión. Se podrá superar la distancia indicada de 150 km con objeto de alcanzar la terminal de transporte adecuada más cercana para el servicio previsto, en el caso de vehículos articulados de 5 o 6 ejes, formados por un vehículo motor de 2 ejes y con semirremolque de 3 ejes, o por un vehículo motor de 3 ejes y semirremolque de 2 o 3 ejes”.

Aun así, en la mayoría de los casos un camión con chasis combinado puede transportar tanto un contenedor de 40 ft, de 20 ft o, e incluso, dos contenedores de 20ft. Pudiendo el camión estar cargando contenedores vacíos, cargados o ambos estados. Además hay que recalcar que algunos países contemplan un límite de peso de 26 toneladas para los contenedores transportados por un solo camión (Zhang et al., 2015).

### 2.3.1 Operaciones de acarreo

Como se ha comentado al principio de este capítulo, el acarreo terrestre está presente en la etapa inicial y final de la cadena intermodal y tiene lugar el movimiento entre los clientes, la terminal y el depósito. Los movimientos de acarreo pueden estar presentes en más de una terminal intermodal, todo esto dependerá de las distancias que las separen y si sale eficiente cubrir cierto número. Además, en cuanto a la localización de los depósitos, estos pueden ser cercanos a la terminal intermodal o incluso pueden encontrarse dentro de la misma.

Así pues, a continuación, se muestra en la Figura 1 los diferentes movimientos dentro del acarreo:

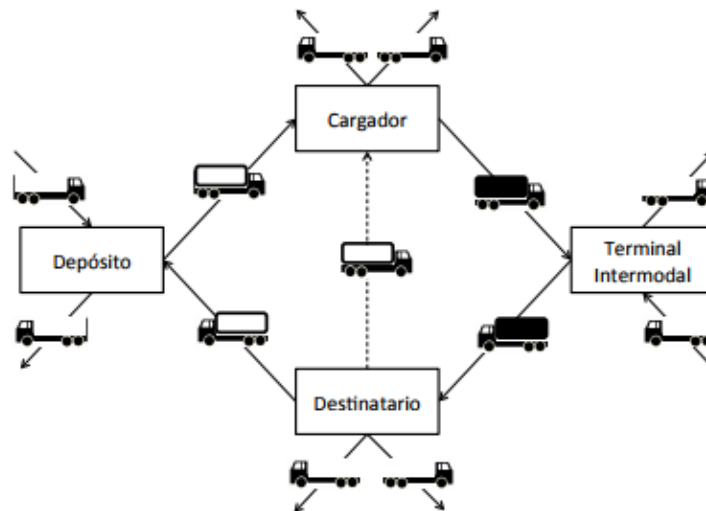


Figura 1: Movimientos posibles dentro del acarreo terrestre. Fuente: Escudero-Santana (2013)

Según Escudero-Santana (2013), dentro de todas las operaciones posibles, destacan la recogida de la mercancía en el origen, también conocido como *pick up* y, también la entrega de los contenedores en el destino o *delivery*. En el transcurso de estos movimientos, hay que hacer referencia a los diferentes estados en los que se pueden encontrar los camiones dependiendo de las circunstancias de cada uno y del cliente. Efectivamente, estos pueden ir cargados con un contenedor lleno (LOAD), con un contenedor vacío (DEAD-HEAD) o incluso ir sin carga (BOBTAIL). Esto último se puede ver representado en la Figura 2:

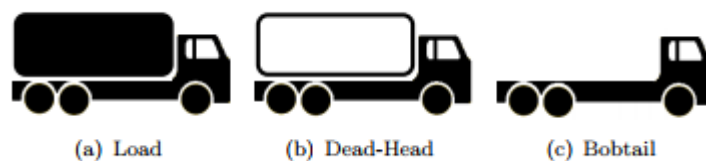


Figura 2: Estado de los camiones en función de la carga transportada. Fuente: Escudero-Santana(2013)

Dicho lo anterior, se llega a la conclusión de que dentro de una petición de movimiento de contenedor se llevará a cabo como mínimo dos operaciones: una de recogida y otra de entrega de la mercancía. Al conjunto de estas operaciones se les denominará tarea de acarreo. Como se puede comprobar, en estos trayectos el camión puede ir lleno o por el contrario vacío, pero cabe destacar que el fin de del transporte de mercancías es en todo momento el movimiento de bienes. Así es que sus principales movimientos corresponderán por tanto al transporte de contenedores llenos.

Sin embargo, no se le debe restar importancia a los traslados de contenedores vacíos, ya que hay que reducir lo máximo posible estas situaciones. No obstante, serán inevitables ya que estos trayectos son el resultado de la disponibilidad de los recursos en el momento y sitio precisos. También, otro aspecto influyente en este tipo de viajes es la pertenencia de dichos contenedores ya que podría estar ligado a cualquier actor de la cadena, es decir, en este caso al responsable del trayecto principal, al cargador o al destinatario. Dependiendo cual sea el responsable, se hará un tratamiento específico en el transporte de contenedores.

Se ha destacado la importancia de ahorrar en el desplazamiento de contenedores vacíos. Un modo para disminuirlo es el *bypass*, movimiento que viene representado en la Figura 1 mediante la línea discontinua. Este consiste en la transferencia directa de la mercancía entre distintos clientes, en el caso de la ilustración corresponde al transporte directo desde el destinatario hasta el cargador. En otros casos, estos contenedores desocupados pueden esperar en la terminal mediante su provisión en depósitos.

Acorde con el origen y destino del movimiento llevado a cabo, tendrá lugar tareas de importación o en caso contrario, de exportación. En el primer caso, el desplazamiento tiene lugar desde la terminal hasta el destinatario, sin embargo, la exportación tendrá lugar entra el cargador y la terminal. En ambos casos, el origen y destino están ya establecidos ya de antemano. No obstante, no todas las operaciones pueden definirse de forma tan precisa, y al mismo tiempo vienen precedidas de cierta flexibilidad, como es el caso en el que un cliente exija un contenedor vacío para su posterior uso en el transporte de mercancías, el cual no tiene reparo del origen de este pudiendo así proceder este del depósito o de un cliente que no lo va a reclamar en el futuro. Así pues, se podrá clasificar estas operaciones en tareas bien definidas y tareas flexibles respectivamente en atención a la procedencia de la unidad de carga.

De esto modo, se pueden denominar a estas operaciones de recogida y entrega como tareas de básicas de acarreo, dónde la unión de unas cuantas puede desencadenar la aparición de operaciones complejas, dando lugar a la ejecución de dos operaciones seguidamente. Estos procedimientos se llevan a cabo cuando el cliente reclama el contenedor para proseguir sus envíos o desde otra perspectiva, cuando el cliente no disponga de capacidad para el almacenamiento de contenedores y una vez que se hayan ejecutado las operaciones de descarga pertinentes se proceda a la devolución del mismo. Ante estas situaciones, se pueden llevar a cabo dos pautas:

- Espera del conductor junto al contenedor a lo largo de transcurso de la operación, denominada esta como *stay- with* (SW).
- El conductor abandona el contenedor y durante la manipulación de este por parte del cliente, dicho conductor desempeña otras operaciones. Esta manera de actuar es conocida como *drop&pick* (D&P). Al finalizar el cliente su labor de carga o descarga se procede a la recogida del contenedor, ya esta fase no tiene que ser realizada por el mismo conductor.

Por ende, se definirá cada operación del acarreo terrestre mediante el tipo de operación y el puesto dónde transcurre, también se le asocia el cambio de estado del vehículo en cada tarea. Así pues, a continuación se muestra en la Tabla 1 las posibles operaciones tanto simples como compuestas, establecidas por Escudero-Santana (2013), que se pueden llevar en función de los parámetros comentados:

Tabla 1: Conjunto de operaciones posibles en las operaciones de acarreo terrestre. Fuente: Escudero Santana (2013)

Tipo	Descripción	Estado del camión	
		<u>Pre</u>	<u>Post</u>
$D^l$	Entrega de contenedor lleno	Load	Bobtail
$P^l$	Recogida de contenedor lleno	Bobtail	Load
$D^e$	Entrega de contenedor vacío	Dead-head	Bobtail
$P^e$	Recogida de contenedor vacío	Dead-head	Load
$D^e \& P^l_{D\&P}$	Entrega vacío y recogida cargado	Dead-head	Load
$D^l \& P^e_{D\&P}$	Entrega lleno y recogido vacío	Load	Dead-head
$D^l \& P^l_{D\&P}$	Entrega lleno y recogido lleno	Load	Load
$D^e \& P^l_{SW}$	Entrega vacío y recogida cargado	Dead-head	Load
$D^l \& P^e_{SW}$	Entrega lleno y recogido vacío	Load	Dead-head
$D^l \& P^l_{SW}$	Entrega lleno y recogido vacío	Load	Load

Otro aspecto de vital importancia para el correcto funcionamiento de la cadena intermodal a tratar es la limitación del marco temporal que experimentan dichas operaciones. Como se ha explicado en ocasiones anteriores, las operaciones de acarreo engloban los requerimientos de recogida o entrega de contenedores, así como la reubicación de los contenedores vacíos. En general, los diferentes actores de esta cadena precisan que se planifique el desplazamiento dentro de un recto límite temporal.

Según Agüera y Escudero-Santana (2015), estas restricciones temporales se pueden ver reflejadas tanto en las exportaciones como en las importaciones, aunque cada una busca limitaciones diferentes. En el primer caso se lleva a cabo limitaciones temporales relativas a la hora programada de salida del tren o barco, es por esto por lo que hay establecida una hora de llegada a la terminal. Por consiguiente, si la mercancía no está disponible para que se lleve a cabo su carga en ese instante, ésta debería esperar a los próximos barcos o trenes provocando así un retraso considerable en la cadena intermodal. Además del coste que supondrá el almacenamiento de la carga a la espera de su recogida. En contraste con esta restricción, aparecen las limitaciones temporales establecidas dentro de las tareas de importación. Aplicar la dinámica de las exportaciones, no aportaría nada ya que estar previamente esperando la llegada de la mercancía sería una pérdida de tiempo.

Este tipo de restricciones en las llegadas y salidas están ligadas al medio de transporte que realiza la operación, en vez de ir implícita a la terminal. En cambio, la terminal imputará otro tipo de limitaciones, como facilitar una ventana temporal en la cual no se imputen en costes extras. Así pues, se cargarán costes por razón de almacenamiento en el caso de que la carga exportada se encuentre en la terminal antes de la hora impuesta por dicho marco. De forma similar se actuará en el caso de las importaciones si el contenedor no es retirado después de la hora establecida.

# 3 EL PROBLEMA DE ACARREO TERRESTRE CON VARIOS TAMAÑOS DE CONTENEDORES

---

## 3.1 Definición

El transporte de contenedores por camión se lleva a cabo principalmente en un área local, antes o después de la carga de estos a larga distancia a través del barco o el tren. Como se ha comentado anteriormente en múltiples ocasiones, este tipo de transporte es también conocido como acarreo o *drayage* acorde con diversos estudios (Cheung et al, 2008; Escudero-Santana et al, 2013; Namboothiri y Erera, 2008.; Zhang et al, 2011).

El problema del transporte de contenedores en camión (CTT) es un tema candente en la logística moderna de contenedores en el ámbito mundial. Tal como expone Cheung et al. (2008) poder transportar los contenedores de puerta a puerta, hace que la labor proporcionada por los camiones sea esencial. Esta flexibilidad a la hora de entregar la mercancía a una localización exacta resulta difícil llevarla a cabo por embarcaciones o trenes. En cuanto a su impacto económico, el costo de contenedor por kilómetro en este tipo de problema es relativamente elevado. Otras desventajas que se pueden apreciar con el uso del transporte en camión son los retrasos en el embarque de mercancías o la congestión en las carreteras.

Por consiguiente, cada vez se presta más atención a este tipo de problema ya que cualquier mejora que se implemente en este campo se verá reflejado en un ahorro tanto económico como de tiempo.

En ocasiones el problema CTT es considerado como un “*Pick-up and delivery problems*” (PDPs). No obstante, el problema CTT difiere de este tipo de problemas. Ya que no solo trata el transporte entre localizaciones de recogida y entrega, sino que también aplica estas mismas operaciones a los contenedores vacíos en las terminales. Por ejemplo, si un contenedor de carga tiene que ser recogido en la terminal y repartido a su cliente, se liberará un contenedor vacío una vez que se haya realizado la entrega. Así pues, este deberá ser enviado a su depósito o a un emplazamiento alternativo para su futuro uso. Como resultado, con este ejemplo se hace patente la relevancia que supone considerar conjuntamente el manejo de los contenedores vacíos con el transporte de los contenedores cargados requeridos, lo cual complica en gran medida el problema CTT.

Por otra parte, se ha prestado poca atención al problema CTT con contenedores de múltiples tamaños. La mayoría de los artículos que abordan este tipo de problemas asumen que únicamente se puede cargar un contenedor de una sola vez, por consiguiente, no consideran varios tamaños de contenedores. Y aun habiendo autores que han considerado múltiples dimensiones a la hora de resolver la ruta y programación de camiones, no han tenido en cuenta los movimientos de los contenedores vacíos.

A lo largo de este trabajo, se abordarán tres versiones diferentes del problema. En todas estas, se transportarán contenedores de 40 y 20 pies, pero a medida que se pasa de una versión se aplicarán nuevas restricciones. En primer lugar, se podrá transportar dichos contenedores de manera separada, es decir, el camión no podrá simultáneamente cargar dos contenedores de 20 pies. En cambio, en la segunda si se podrá combinar los contenedores, pudiendo llevar a cabo al mismo tiempo dos órdenes diferentes. Por último, la tercera versión aplicará un límite de peso por camión, limitando así los pedidos que se pueden realizar.

### 3.1.1 El problema MSCTT

Por lo tanto, a vista de lo comentado anteriormente, este trabajo se centrará en el problema multi-tamaño CTT tratando con la carga de contenedores de 20 y 40 pies. De este modo, estamos frente al problema conocido como MSCTT, cuyas siglas provienen de su nombre en inglés “*Multi-Size Container Truck Transportation*”.

Este problema se podría aplicar a una compañía de transporte cuyo fin sería proporcionar servicios de acarreo de contenedores en un área local; luego para ello contaría con una flota de camiones y un depósito donde apilar tanto los contenedores vacíos como para estacionar los camiones que no están de servicio. Los contenedores solicitados tendrán como lugar de origen o destino una terminal, esta podría ser un puerto marítimo o una estación de tren.

Por otro lado, el problema MSCCTT impone una restricción del tiempo máximo de acarreo, siendo normalmente el horizonte temporal un día. El problema integra las solicitudes de transporte presentadas por los clientes y los movimientos implícitamente requeridos de contenedores vacíos.

Atendiendo a los pedidos de contenedores por acarreo, se pueden clasificar en dos grupos considerando sus direcciones. Por consiguiente, los contenedores que se han entregado desde otras áreas a la terminal se denominan órdenes de llegada (inbound orders) o, dicho de otro modo, son los contenedores importados. El otro grupo está conformado por los contenedores que necesitan ser recogidos en las ubicaciones de los clientes y deben ser enviados a la terminal para su posterior transporte que son llamados órdenes de salida (outbound orders) o del mismo modo, pedidos exportados. Por otro lado, esta clasificación a su vez debe tratar tanto con contenedores llenos como vacíos. Esto quiere decir que según el estado de estos se actuará de una manera específica como se verá a continuación.

### 3.1.1.1 Contenedores llenos

La mayoría de los pedidos por acarreo corresponden a contenedores completos. Para las órdenes entrantes completas, un contenedor lleno situado en la terminal debe ser recogido y entregado a su cliente. Luego se libera un contenedor vacío y así, está listo para ser reutilizado después de descargarlo y desempaquetarlo. Ya vacío se deberá entregar al depósito o al exportador de una orden completa de salida, tal como se puede ver representado esquemáticamente en la Figura 3.

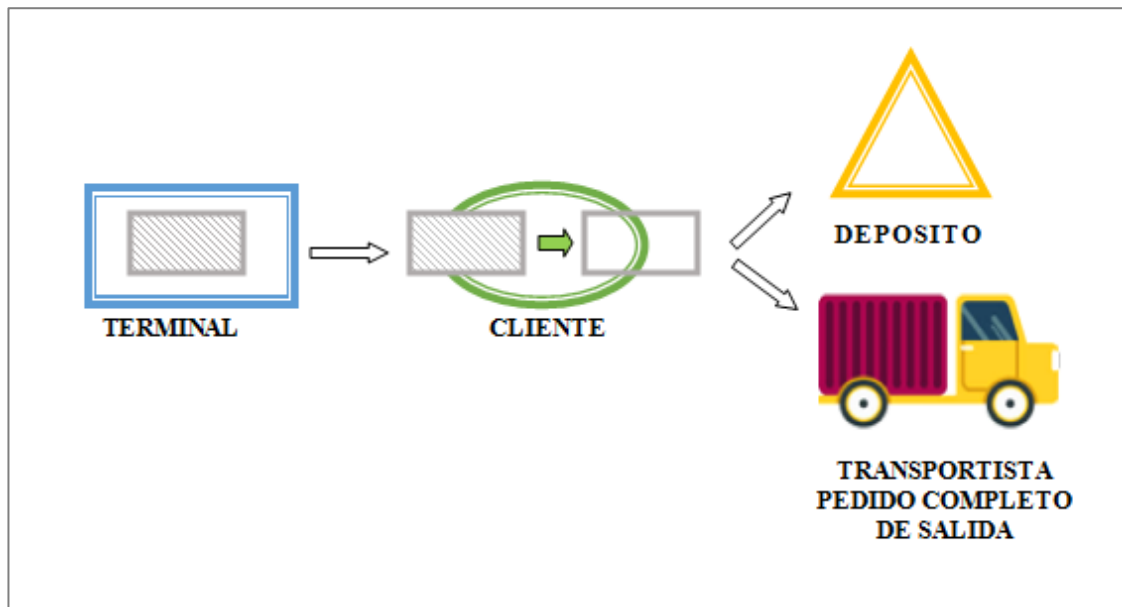


Figura 3: Orden de entrada completo

En el lado opuesto se encuentran los pedidos de salida completos, representados en la Figura 4, que en realidad no es más que una solicitud de transporte de carga mediante contenedores. De este modo, se requiere que un contenedor vacío sea entregado al cliente antes de que la carga sea empaquetada y seguidamente se trasladará la carga a la terminal. Visto esto se puede decir que además de los camiones, los contenedores también son recursos de transporte.



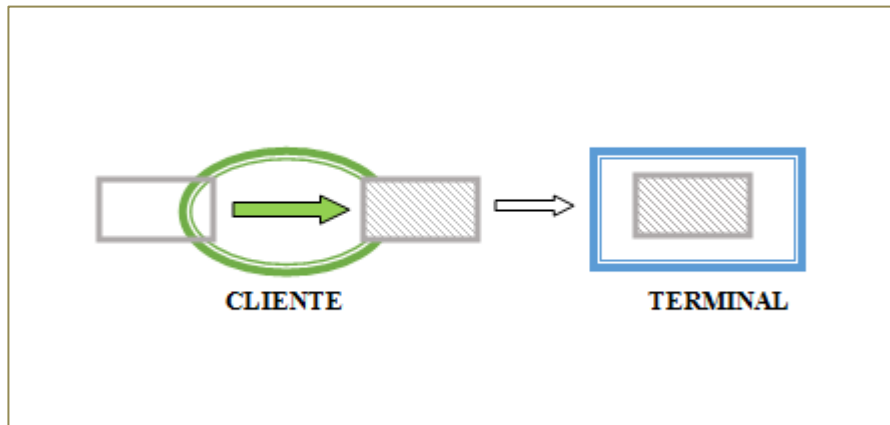


Figura 4: Orden de salida completa

A partir de ahora, cuando aparezca el concepto de contenedor de entrada o de salida, se estará refiriendo a una orden de entrada o de salida respectivamente. En el caso en el que un cliente tenga varios contenedores en sus pedidos, la orden se desglosará en varios pedidos, de modo que a cada pedido le corresponda un contenedor.

### 3.1.1.2 Contenedores vacíos

Como se ha comentado anteriormente, el problema que se va a plantear aborda también el movimiento de los contenedores vacíos, el cual conformarán como indica su nombre los pedidos del contenedor vacío. Así pues, en áreas dominantes de exportación, tales como China o Corea del Sur, se da un mayor número de exportación de cargas que importación. Provocando así frecuentemente una falta de contenedores vacíos.

Por consiguiente, las compañías de transporte por camión necesitan importar contenedores vacíos de otras áreas, como Estados Unidos o Europa, periódicamente. En este grupo, solo se trata los contenedores vacíos de entrada ya que la finalidad es importarlos. Luego los contenedores vacíos de llegada están localizados en la terminal y deben ser entregados al depósito o a un lugar alternativo que precise de ellos. De igual modo que en el caso de los contenedores llenos, los vacíos corresponden a las órdenes de contenedores vacíos de entrada. A continuación, en la Figura 5, se muestra el esquema de los movimientos que se llevan a cabo.

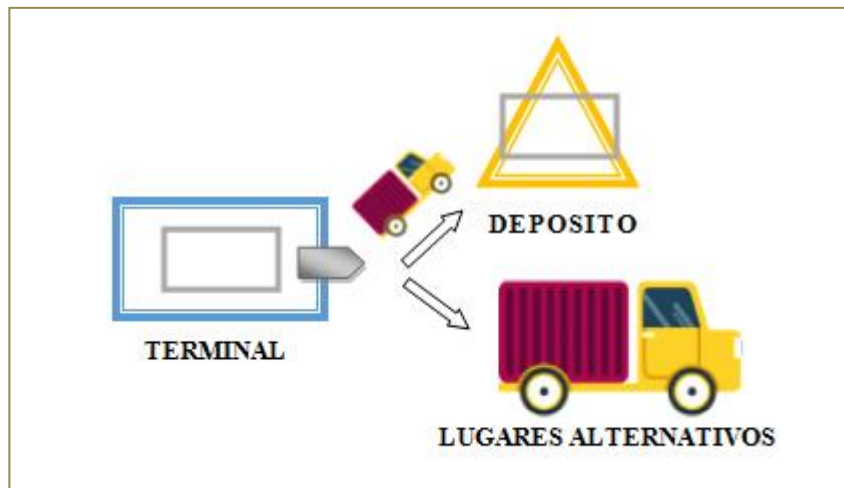


Figura 5: Orden de contenedores vacíos de llegada

### 3.1.1.3 Conjunto de órdenes

Los tipos de contenedores considerados en este problema pueden ser de 40 o 20 pies de dimensión, lo cual es muy común en la vida real. La compañía de transporte contará con una flota homogénea de camiones, donde cada camión con chasis combinado puede cargar un contenedor de 40 pies o uno o incluso dos de 20 pies de una sola vez.

De este modo, para un área de exportación dominante, el problema MSCCTT abarca una totalidad de seis tipos de órdenes. El conjunto de estos se denomina  $O$ , y está formado a su vez por una serie de subconjuntos donde cada uno de ellos corresponden en particular a un tipo de pedido.

$$O = O_{IF4} \cup O_{OF4} \cup O_{IE4} \cup O_{IF2} \cup O_{OF2} \cup O_{IE2}$$

Siendo cada subconjunto:

$O_{IF4}$ : Orden de llegada completa de 40 pies

$O_{OF4}$ : Orden de salida completa de 40 pies

$O_{IE4}$ : Orden de llegada vacía de 40 pies

$O_{IF2}$ : Orden de llegada completa de 20 pies

$O_{OF2}$ : Orden de salida completa de 20 pies

$O_{IE2}$ : Orden de llegada vacía de 20 pies

Por otro lado, cada pedido con un contenedor completo tiene un cliente. Ya sea el caso del receptor de una orden de contenedor de entrada lleno o el exportador de una orden de contenedor de salida completo. Siendo  $c_i$  la localización del cliente de un pedido de contenedor lleno  $i \in O_F$ , donde:

$$O_F = O_{IF4} \cup O_{OF4} \cup O_{IF2} \cup O_{OF2}$$

Además, habrá que tener en cuenta el tiempo de viaje de los camiones,  $\tau(l, l')$ , entre dos ubicaciones  $l$  y  $l'$ . En cuanto a las ubicaciones se pueden dar diferentes casos, por un lado  $l$  (o  $l'$ ) es el depósito si  $l = d$ , la terminal si  $l = t$  o en otros casos, la ubicación de un cliente de un pedido de contenedor completo.

Resumiendo, con lo detallado anteriormente, acorde a Zhang et al. (2015), el problema MSCCTT se contempla desde la perspectiva de un planificador de la flota de camiones. Consecuentemente, la empresa de transporte por carretera debe llevar a cabo las órdenes de acarreo del conjunto  $O$ , definido a lo largo de este apartado. Se tendrá que tener en cuenta los siguientes aspectos a la hora de planificar:

- El número de camiones de la flota  $k$
- El periodo de tiempo con el que se va a trabajar, generalmente un horizonte temporal de un día
- El enrutamiento de camiones como el reposicionamiento de contenedores vacíos se deben considerar simultáneamente
- El tiempo de trabajo de cada camión durante cada horizonte temporal dado no puede exceder un límite, indicado por  $T$

En definitiva, el criterio de optimización que se va a establecer es la minimización del tiempo total de viaje. No solo eso, también escogiendo este criterio se podrá ver reflejado hasta cierto punto, de forma indirecta, la distancia del viaje total y el costo total de este.

### 3.2 Estado del arte

En primer lugar, cabe destacar que las operaciones de contenedores en terminales y los sistemas de transporte en tierra atraen en gran medida la atención académica en la última década. Así pues, Vis y de Koster (2003) presentaron una investigación primaria sobre el transbordo de contenedores en las terminales Y por otro lado Vob et al. (2004) llevan a cabo una amplia revisión literaria sobre la investigación de los problemas operativos asociados a las terminales de contenedores.

Últimamente, un gran número de artículos se centran en los sistemas de transporte de contenedores en dichas terminales. Como es el caso de los siguientes autores:

- Coslovich et al. (2006) proponen un modelo de programación entera para resolver el problema de minimizar los costes de enrutamiento en el acarreo de contenedores, los costes de asignación de conductor y camión y, por último, los costes de reposición de contenedores.

- Smilowitz (2006) formula el problema de acarreo de contenedores como uno de enrutamiento multi-recurso.
- Namboothiri y Erera, (2008) estudian el problema CTT a través de un sistema de designación de puerto.
- Cheung et al. (2008) y posteriormente Loo (2010) investigan el problema de acarreo de contenedores de “La frontera cruzada” (cross-boundary) tomando la región Hong Kong – Pearl River Delta como el área considerada.
- Steenken et al. (2008) resumen y actualizan la literatura sobre las investigaciones de los problemas operacionales en las terminales de los contenedores.

En esta revisión bibliográfica se mostrará dos enfoques diferentes que se ha tomado a la hora de estudiar el problema de acarreo terrestre. Por un lado, se encuentra los PDPs o conocido en inglés como “Pick up and delivery problems”. Este tipo de problemas son los más directos de para formular el problema CTT ya que normalmente contemplan la recogida de contenedores en algún emplazamiento para ser entregados a otro lugar. Sin embargo, en contraste con el anterior problema, se va a estudiar algunos tipos de pedidos en los problemas CTT que muestran flexibilidad, como es el caso de la importación de contenedores vacíos. Y para finalizar se revisa la literatura perteneciente al transporte en camión de los contenedores multi-tamaño que posteriormente dicho caso se incorporará en el problema a tratar en este trabajo.

### 3.3.1 “Pick-up and delivery problems”

Como se ha venido comentado en apartados anteriores, el PDP es un problema de recogida y entrega, donde cada solicitud de transporte especifica un único origen y a su vez, un único destino. Además, todos los vehículos que conforman la flota parten y regresan a un depósito central.

En cuanto a los estudios realizados sobre este prototipo de problemas, se muestra una breve reseña a continuación:

- Imai et al. (2007) formulan un problema CTT con carga de contenedores llenos como un modelo programación puramente lineal binario y diseña una heurística relajada Langraniana para resolverlo.
- Braekers et al. (2013) presentan una heurística de búsqueda local para resolver un problema similar al de acarreo previo y final de contenedores
- Escudero-Santana et al. (2013), estudian la recogida y entrega de contenedores con incertidumbre en los tiempos de tránsito
- Máhr et al. (2009) y Long et al. (2015) resuelven un problema similar con incertidumbre usando un enfoque del método basado en agentes y un método de aproximación de media simple, respectivamente
- Ting y Liao (2013) relajan las restricciones de todos aquellos nodos que deben ser visitados y formula un problema CTT como un problema selectivo de PDP. Un problema CTT recae en un problema múltiple del vendedor viajero con ventanas temporales (m-TSPTW) si el nodo de recogida y el nodo de entrega de una solicitud se fusionan.
- Wang y Regan (2002) y Jula et al. (2005), formulan los problemas CTT como el problema m-TSPTWs y los resuelven empleando un método basado en la partición de ventanas temporales y un método híbrido de programación dinámica y algoritmos genéticos respectivamente.
- Además, los modelos de decisión de atributo pueden ser usados también para dar solución a los problemas CTT.

### 3.3.2 Pedidos flexibles

Como se ha comentado con anterioridad, los contenedores en los problemas CTT tienen un doble trasfondo. No solo conforman la carga que es transportada, también son tratados como recursos de transporte. De este modo, un contenedor vacío es necesario a la hora de recoger una mercancía y empaquetarla para proceder posteriormente al punto solicitado por el cliente de dicho pedido. También tiene en cuenta el destino de dicho contenedor una vez que la carga haya sido desempaquetada y se encuentre disponible para futuros pedidos.

En definitiva, el transporte de contenedores por acarreo abarca el empaquetado y desempaquetado de estas unidades de carga, en lo referido a los requisitos y liberación de contenedores vacíos.

Ileri et al. (2006), modela el transporte de contenedores por acarreo como un problema de asignación considerando los requisitos implícitos en los movimientos de contenedores vacíos. También Reinhardt et al.

(2012), combina los pedidos importados y exportados por parejas, llamados pedidos de triangulación y modela un problema similar al modelo de programación lineal entera. Por otro lado, Sterzik y Kopfer (2013) define una formulación matemática integral la cual considera el enrutamiento de vehículos y programación y reposición de contenedores vacíos simultáneamente.

Así pues, aparece otra vertiente de modelos de transporte de contenedores que difiere de la visión convencional de los problemas PDP's. Existen pedidos flexibles de transporte, en los cuales algunas propiedades de estos no son dadas y deberían ser fijadas por las decisiones tomadas en las disposiciones de enrutamiento y programación. Normalmente, los contenedores vacíos están involucrados en dichos pedidos flexibles. En la actualidad debido al desequilibrio comercial entre áreas, hay zonas que carecen de contenedores mientras otras poseen excedente. Como consecuencia de esto, importar o exportar contenedores vacíos constituyen un subconjunto de pedidos en los problemas CTT. Teniendo en consideración los contenedores vacíos se han presentado los siguientes estudios:

- Zhang et al. (2009) define el problema CTT con una única terminal, y luego lo extiende al caso de una multi-depósito. Recientemente, Zhang et al. (2011) amplía aún más el problema al introducir un número limitado de contenedores vacíos en los depósitos.
- Braekers et al. (2013) proponen un esquema de planificación integrado eficiente de movimientos de contenedores cargados y vacíos. De forma similar, Lai et al. (2013) también estudia un problema de optimización integrado de enrutamiento de camiones y reposicionamiento de contenedores vacíos.
- Sterzik y Kopfer (2013) investiga la reducción de coste en los problemas CTT mediante el intercambio de contenedores entre compañías de transporte por carretera.

### 3.3.3 Contenedores multi-size

Para finalizar se revisa la literatura que aborda los contenedores multi-tamaño. Pocos artículos tratan los problemas CTT con diferentes dimensiones de los contenedores. Estudios como los de Chung et al. (2007), Vidović et al. (2011) y Popović et al. (2012) afrontan problemas con unidades de carga de 20 y 40 pies. Sin embargo, difieren en ciertos aspectos del modelo que se va a llevar a cabo en este trabajo. Ya que, por ejemplo, los depósitos de contenedores y camiones coinciden con las terminales en alguno de sus problemas. A diferencia de nuestro caso, dónde el depósito y la terminal están diferenciados en ubicaciones distintas, aproximándose más a la realidad ya que diversas empresas de transporten tienen la posibilidad de trabajar en una misma terminal.

## 3.4 Formulación

En primer lugar, cabe señalar que los camiones en el problema MSCTT comienzan inicialmente en el depósito y una vez llevado a cabo sus tareas de acarreo finalmente regresan al depósito. Así pues, después de manejar distintos órdenes, los camiones podrían estar bajo diferentes estados, por ejemplo, sin contenedores o con diferentes tipos de contenedores. Luego las diferentes operaciones deberían ser ejecutadas en estados distintos, dando como resultado una formulación basada en la transición del estado del problema MSCTT. Aunque este trabajo no abordará el modelo matemático en sí, sino que se programará el algoritmo Búsqueda Tabú y el del Recocido Simulado para establecer la ruta de la flota de camiones. Sería interesante ahondar en la formulación basada en la transición del estado. De este modo, a continuación, se irá detallando como se formulará dicho problema bajo esta premisa, ya que será de utilidad a la hora de programar y comprender los entresijos de este tipo de problema.

### 3.4.1 Formulación basada en la transición del estado

Para comenzar a entrar en detalle de cómo se plantearán los diferentes estados, primero se debe aclarar el concepto de estado. Por ejemplo, si un camión recoge un contenedor de llegada completo de 40 pies ( $i \in O_{IF4}$ ) en la terminal, seguidamente lo llevará hasta el cliente  $c_i$  (Situación 1). Una vez que el contenedor haya sido entregado a su cliente, la única opción viable para manejar el contenedor es desempaquetarlo y liberarlo. Sin embargo, el manejo del contenedor vacío liberado depende del tipo de orden de acarreo que el camión lleva a cabo a continuación (Situación 2).

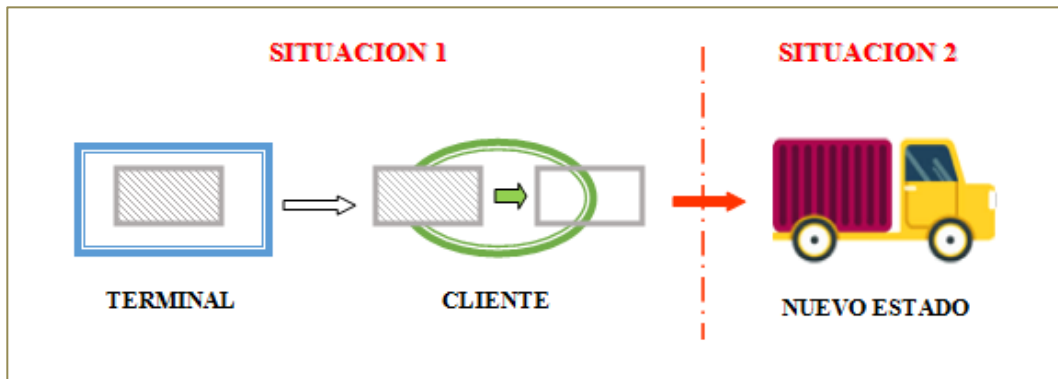


Figura 6: Ejemplo de un pedido de contenedor de llegada completo

La diferencia entre ambas situaciones, representadas en la Figura 6, se centra en la necesidad de definir un estado. De este modo la situación dos requiere de un estado para describir su última situación, mientras que la primera no requiere de ningún estado. En resumidas cuentas, la operación que viene después de una operación de acarreo ya establecida y realizada, precisa de un nuevo estado que describa la siguiente operación a realizar.

Cabe señalar que los camiones tanto al inicio como al final se encuentran en el depósito, así de esta manera para una formulación uniforme, tanto el inicio desde el depósito como el retorno a este constituyen una orden virtual, indicada por la Orden 0. Por otro lado, hay que tener en cuenta la suposición del “full-twin”, este tipo de situaciones por ejemplo se da cuando un camión transporta dos contenedores llenos de 20 pies cada uno y ha comenzado a manipular uno de ellos. Una vez que haya acabado con el contenedor que estaba manipulando, el segundo debe ser manejado antes de que se tramite otros nuevos pedidos. Esto último será un tema relevante a la hora de programar la segunda versión del problema, ya que limitará la planificación de los pedidos. Otro punto por marcar es que no se va a dar el mismo programa de ruteo aun teniendo la misma orden de transporte, como premisa se tendrá que diferentes estados darán lugar a diferentes programas de ruteo.

En cuanto a la formulación de los estados de los camiones, se tendrá uno o dos parámetros dependiendo del tipo de orden. En todas las órdenes aparecerá un parámetro que corresponde a la ubicación actual del camión, sin embargo, tanto en las ordenes completas de salida y entrada de 20 pies se adiciona otro parámetro que identifica el pedido que está acarreado el camión.

En la tabla siguiente se muestran los seis estados que se van a dar en el problema a tratar.

Tabla 2: Tipo de contenedores y posibles localizaciones

Estado	Tipo y N° contenedores	Posibles ubicaciones
$S_N(l)$	Sin contenedor	$l \in \{d, t\}$
$S_{E4}(l)$	Un contenedor vacío de 40 pies	$l \in \{t, c_i   i \in O_F\}$
$S_{E2}(l)$	Un contenedor vacío de 20 pies	$l = t$
$S_{2E2}(l)$	Dos contenedores vacíos de 20 pies	$l \in \{t, c_i   i \in O_F\}$
$S_{IF2}(l, i)$	Un contenedor completo de llegada de 20 pies del pedido $i$	$l = t$
$S_{OF2}(l, i)$	Un contenedor completo de salida de 20 pies del pedido $i$	$l \in \{d, t, c_i   i \in O_F\}$

Como se puede observar, algunos estados pueden estar relacionados a ciertas ubicaciones. Por ejemplo,  $S_{E2}$  y  $S_{IF2}$  podrían estar solo en la terminal. Además, no por ser diferentes órdenes de acarreo se van a dar distintos estados. Ya sea el siguiente caso ilustrado de dónde se pueden ver dos órdenes diferentes partiendo del mismo estado inicial. El primer camión recoge un pedido de contenedor completo de llegada de 40 pies y se lo entrega a su receptor para desempaquetarlo. En cambio, el segundo recoge un pedido de contenedor vacío de 40 pies en la terminal. Ambos acaban con el mismo estado, aunque difiere la ubicación del camión siendo el emplazamiento donde se sitúa el cliente y la terminal, respectivamente.

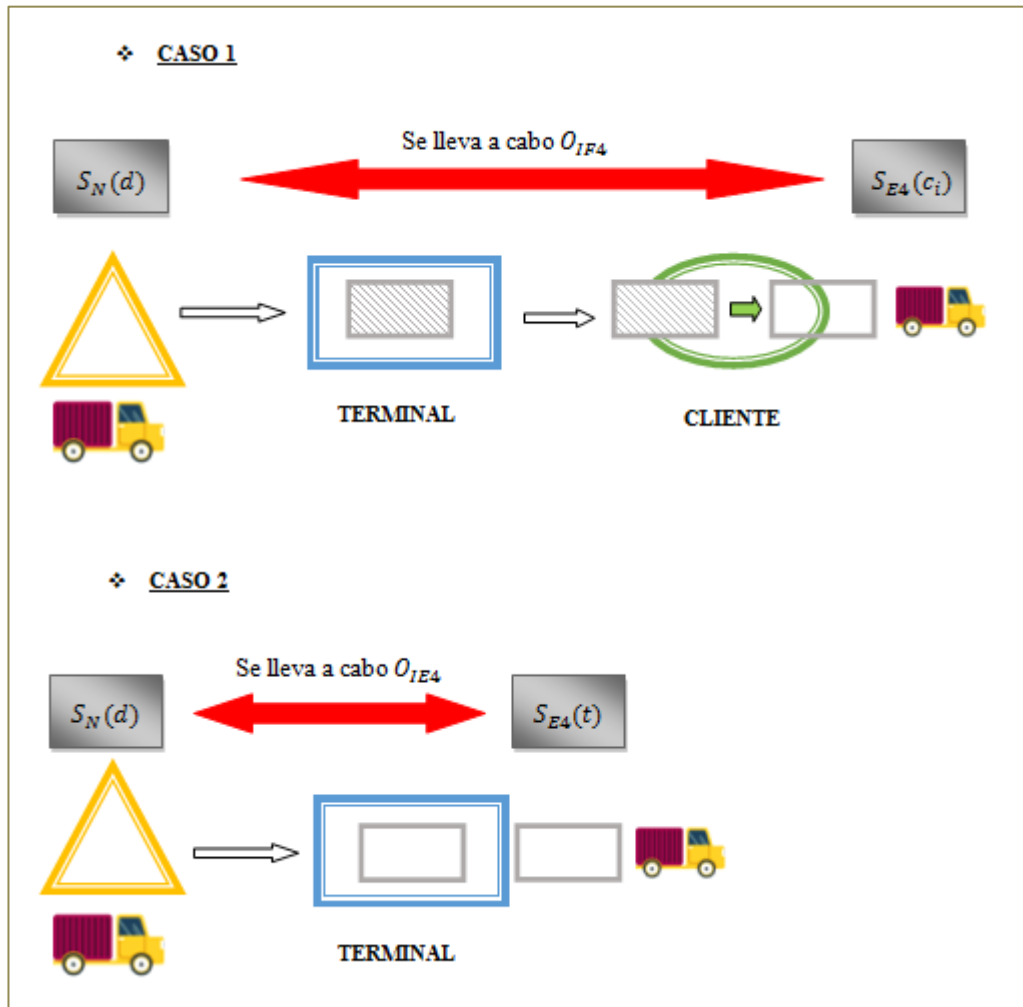


Figura 7: Órdenes diferentes partiendo del mismo estado inicial

### 3.4.2 Inicialización del problema

Las tres versiones llevadas a cabo parten de los mismos datos iniciales de entrada. De este modo, lo que les diferenciarán entre sí serán las restricciones impuestas en su formulación. A continuación, se va a detallar los datos de entrada fijados:

- $nc$ : Número de clientes que demandan pedidos
- $hor_{temp}$ : Horizonte temporal de trabajo de los camiones
- $est_{cam}$ : Estado del camión. Al inicio y al final, el camión deberá estar vacío, sin contenedor alguno y a lo largo del día el camión variará su estado en función de las órdenes asignadas.
- $loc_{act}$ : Localización actual del camión a lo largo de su horizonte temporal. Esta variable, al igual que el estado del camión, irá cambiando en función de las órdenes efectuadas. Cabe destacar que el camión debe iniciar y finalizar su trayecto en el depósito donde se encuentra la flota de camiones.

Tabla 3: Nomenclatura de la localización de los clientes

$loc_{act}$	Localización
$1 \dots nc$	Localización del cliente $1 \dots nc$
$nc + 1$	Depósito de la flota de camiones
$nc + 2$	Terminal

- **Mat<sub>tiempo</sub>**: Matriz de tiempos, la cual asigna los tiempos entre las distintas localizaciones. La dimensión de esta matriz se verá condicionada por el número de clientes, siendo esta  $(nc + 2) \times (nc + 2)$ . Se le suma dos, ya que esas dos últimas posiciones tanto de la fila como de la columna pertenecen al depósito y a la terminal.
- **Mat<sub>cliente</sub>**: Matriz binaria dónde se fija las órdenes pedidas por cada cliente. De este modo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{Mat}_{cliente}(i, j) = \mathbf{1} : \text{el cliente } i \text{ ha demandado el tipo de orden } j \\ \mathbf{Mat}_{cliente}(i, j) = \mathbf{0} : \text{el cliente } i \text{ no ha demandado el tipo de orden } j \end{array} \right\}$$

Donde los pedidos a demandar tienen la siguiente distribución en la matriz:

Tabla 4: Posición en la matriz según el tipo de orden

j	Tipo de orden	
1	$O_{IF2}$	Orden de llegada completa de 20 pies
2	$O_{IF4}$	Orden de llegada completa de 40 pies
3	$O_{IE2}$	Orden de llegada vacía de 20 pies
4	$O_{IE4}$	Orden de llegada vacía de 40 pies
5	$O_{OF2}$	Orden de salida completa de 20 pies
6	$O_{OF4}$	Orden de salida completa de 40 pies

- **Mat<sub>pesos</sub>**: Matriz de pesos donde se establece los pesos de cada cliente con la orden demandada. En dicha matriz, cada fila corresponde con un cliente  $i$  y las columnas  $j$  designa el pedido demandado. Si en la posición  $(i, j)$  el peso es nulo significa que ese cliente no tiene asociado dicho pedido
- **Peso<sub>max</sub>**: Límite de peso que puede cargar el camión

### 3.4.2.1 Solución inicial

Los algoritmos empleados para la resolución del problema planteado parten de una solución inicial. Dicha solución ha sido hallada por medio de otro algoritmo, 'El vecino más próximo', a través del cual en cada iteración se va asignando aquella orden que supone un menor tiempo en el desplazamiento. En esta solución, habrá que tener en cuenta las restricciones que se presentan en cada versión, para que se llegue a una solución factible.

Además de estas limitaciones, se debe presentar una solución que no exceda el horizonte temporal por camión.

En consecuencia, este algoritmo finalizará cuando se haya asignado a los camiones el total de las órdenes de cada cliente y, así pues, en cada iteración de dicho método se asignará una orden hasta completar todos los pedidos.

Por último, una vez iterado, se genera una lista de órdenes, clientes y pesos divididos por camiones, con el correspondiente valor de la función objetivo de dicha solución. De esta forma estas listas quedarían tal que así:

$$orden_{cam} = [[\text{órdenes camión } 1], [\text{órdenes camión } 2], \dots, [\text{órdenes camión } k]]$$

$$cliente_{cam} = [[\text{clientes camión } 1], [\text{clientes camión } 2], \dots, [\text{clientes camión } k]]$$

$$peso_{cam} = [[\text{pesos camión } 1], [\text{pesos camión } 2], \dots, [\text{pesos camión } k]]$$

En estas listas aparecen las órdenes, los clientes y el peso neto del contenedor correspondiente a dichas órdenes alineadas. De modo que una misma posición (i, j) está referida a la misma orden j y, por tanto, a su vez, al mismo camión i.

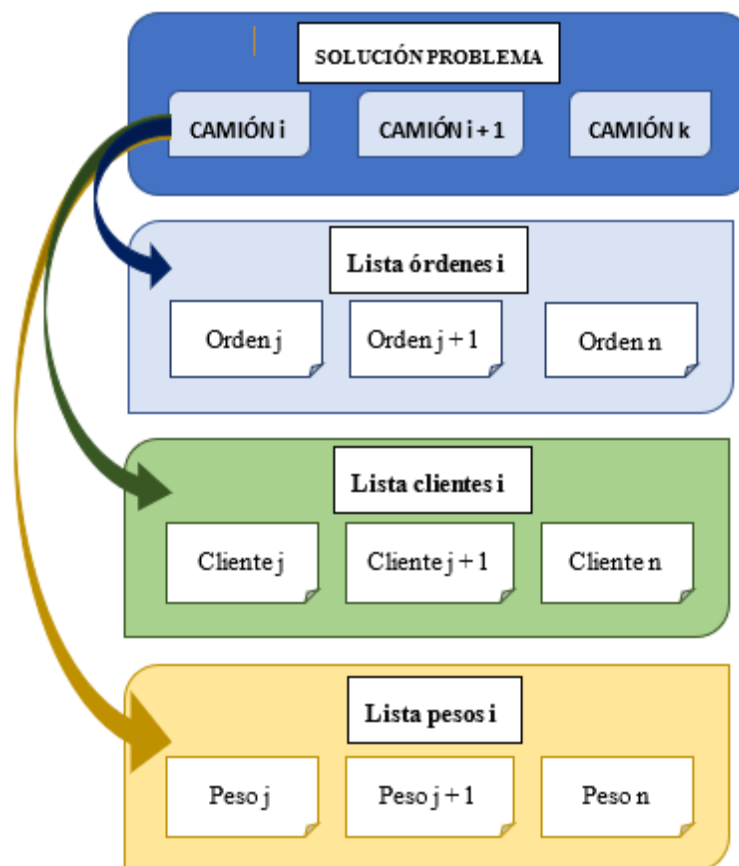


Figura 8: Esquema de la formulación de las soluciones obtenidas

### 3.4.3 Versión 1: Cada camión solo puede llevar un contenedor

En esta versión gozan de un mismo trato los contenedores, independientemente del tamaño de cada uno de ellos. Por tanto, la combinación de contenedores de 20 pies no se podrá efectuar, limitando así ciertos movimientos interesantes que podrían disminuir el tiempo empleado en realizar una orden.

En dicha versión se ha empleado un estado relacionado con los contenedores llenos, ya que el programa una vez que acomete una orden emplea el estado inicial y el final, no tiene en cuenta los estados intermedios por los que pasa el camión. Consecuentemente, el camión al inicio o al final de una orden estará cargado con un contenedor



vacío sobrante de otro pedido o, por lo contrario, no transportará ningún contenedor. Por tanto se emplea los siguientes estados:

Tabla 5: Posibles estados de los camiones en la versión 1

Estado camión	
$CV_{20}$	Contenedor de 20 pies vacío
$CV_{40}$	Contenedor de 40 pies vacío
$SC$	Sin contenedor

Debido a la naturaleza del problema en esta versión, cuando se produce una orden de llegada o de salida de contenedores de 20 pies y el estado del camión sea  $CV_{20}$ , siempre habrá que soltar este contenedor en el depósito excepto en el caso de una orden de llegada vacía. Esto es debido a que este tipo de pedido trae consigo la entrega de un contenedor vacío y libre, es decir, que no posee destinatario. Así pues, es aprovechado para entregarlo a un cliente que demande contenedores vacíos de ese tamaño.

Para ver esto más claro, se va a exponer las diferentes situaciones que se pueden producir dependiendo del estado inicial y la localización desde la que se parte.

- $D$  : depósito
- $T$  : terminal
- $C_i$ : cliente  $i$  ( cliente cuya orden ya ha sido realizada)
- $C_j$ : cliente  $j$  (cliente de la orden que se está llevando a cabo)

Tabla 6: Posibles escenarios con órdenes de llegada completas

Orden	Estado inicial	Localización inicial	Trayecto	Estado final	Localización final
$O_{IF2}$ $O_{IF4}$	$SC$	$C_i$	$[C_i, T, C_j]$	$CV^*$	$C_j$
		$D$	$[D, T, C_j]$		
		$T$	$[T, C_j]$		
	$CV_{20}$ $CV_{40}$	$C_i$	$[C_i, D, T, C_j]$		

En la tabla anterior se puede contemplar los distintos escenarios que se pueden llevar a cabo si la orden asignada corresponde con una de llegada completa. La trayectoria que se realiza viene marcada por el estado inicial del camión, de este modo si va vacío irá desde su localización actual hasta la terminal para recoger el contenedor y transportarlo hasta su destino. Sin embargo, si el camión lleva consigo algún contenedor libre, sin importar el tamaño de este, deberá ser trasladado hasta el depósito y una vez liberado, ya podrá realizar la maniobra pertinente de recogida y entrega de la unidad de carga de la orden acometida.

Tabla 7: Posibles escenarios con órdenes de salida completas

Orden	Estado inicial	Localización inicial	Trayecto	Estado final	Localización final
$O_{OF4}$	$SC$	$C_i$	$[C_i, D, C_j, T]$	$SC$	$T$
		$D$	$[D, C_j, T]$		
		$T$	$[T, D, C_j, T]$		
	$CV_{20}$	$C_i$	$[C_i, D, C_j, T]$		
	$CV_{40}$	$C_i$	$[C_i, C_j, T]$		
$O_{OF2}$	$SC$	$C_i$	$[C_i, D, C_j, T]$	$SC$	$T$
		$D$	$[D, C_j, T]$		
		$T$	$[T, D, C_j, T]$		
	$CV_{40}$	$C_i$	$[C_i, D, C_j, T]$		
	$CV_{20}$	$C_i$	$[C_i, C_j, T]$		

En cuanto a lo relativo a las órdenes de salida completas, esta vez sí hay que diferenciar si son de 40 o 20 pies en el caso de que vayan cargados de algún contenedor ya liberado del cliente  $i$ . De este modo, si un camión transporta un contenedor vacío de tamaño de 40 pies y está efectuando una orden  $O_{OF4}$ , podrá dirigirse directamente al cliente  $j$  para que el contenedor sea cargado y posteriormente llevado a la terminal. En cambio, si trasladase un contenedor de 20 pies o incluso no llevase ninguna unidad de carga, este debería primero pasarse por el depósito para descargar lo que transporte y llevarse consigo un contenedor vacío de 40 pies para poder dirigirse al cliente  $i$  a cargar su mercancía. En el caso de  $O_{OF2}$ , ocurriría a la inversa, si transportase un contenedor libre de 20 pies, no sería necesario dirigirse hacia el depósito. Sin embargo, en el resto de los casos si tuviera que hacerlo para descargar el contenedor de distinto tamaño si lo tuviera y coger el contenedor de 20 necesario para completar  $O_{OF2}$ .

Tabla 8: Posibles escenarios con órdenes de llegada vacías

Orden	Estado inicial	Localización inicial	Trayecto	Estado final	Localización Final
$O_{IE4}$	SC	$C_i$	$[C_i, T, C_j]$	SC	$C_j$
		$D$	$[D, T, C_j]$		
		$T$	$[T, C_j]$		
	$CV_{20}$	$C_i$	$[C_i, D, T, C_j]$		
	$CV_{40}$	$C_i$	$[C_i, C_j]$		
$O_{IE2}$	SC	$C_i$	$[C_i, T, C_j]$	SC	$C_j$
		$D$	$[D, T, C_j]$		
		$T$	$[T, C_j]$		
	$CV_{20}$	$C_i$	$[C_i, C_j]$		
	$CV_{40}$	$C_i$	$[C_i, D, T, C_j]$		

Por último, queda por analizar el último tipo de órdenes, las de llegada vacías. Son aquellas en las que el cliente demanda un contenedor vacío. Al igual que en el caso anterior, habrá que diferenciar si estas son de 40 o 20 pies, ya que su trayectoria se ve alterada según el estado inicial del que parta.

Si se tratase de  $O_{IE4}$  y acarrease con un contenedor de 40 pies vacío y liberado, no haría falta pedir un contenedor de 40 pies, evitándose así trasladarse hasta la terminal. Sino que directamente, el camión desde la ubicación del cliente  $j$  podría proveer al cliente  $i$  el contenedor vacío que demanda. Otro caso posible, sería que el camión transportase un contenedor de 20 pies para llevar a cabo una orden de 40, por consiguiente, tiene que dirigirse al depósito para soltar el contenedor y posteriormente ir a la terminal a recoger el contenedor vacío deseado. Si no es ninguno de los casos anteriores, significa que el camión va vacío y que puede ir, sin realizar ningún desvío en su trayectoria, a la terminal y finalmente entregar el contenedor vacío al cliente  $j$ . Todo lo comentado anteriormente, se puede aplicar análogamente al modo de operar en la orden  $O_{IE2}$ . La única diferencia radica que, en vez de ir al depósito a soltar el contenedor de 20 pies, se debería soltar el de 40 pies vacío y si se acarrease un contenedor de 20 pies vacío podría ir directo hacia el cliente  $i$  para la entrega de dicha unidad.

### 3.4.4 Versión 2: Cada camión puede llevar varios contenedores, limitado solo por el tamaño de los mismos.

Para esta segunda versión se incorpora una nueva forma de transportar los contenedores. En esta ocasión, los contenedores de 20 pies podían ser transportados simultáneamente y, por tanto, dicha modificación supuso la creación de un nuevo programa, que resolviese la logística de transporte cuando se combinaban este tipo de contenedores. Es decir, en que orden se cogían y se soltaban dichas unidades de carga cuando se produjese la simultaneidad a la hora de transportarlos.

Por ende, habría que establecer una división clara entre las órdenes cuyo transporte es compartido y las que, por otro lado, se efectúan de manera individual. Esta última coincide con el modo de actuación de las órdenes en la versión primera de este trabajo, por lo tanto, seguiría la programación detallada en las Tablas 6,7 y 8

Para clarificar esta segmentación a la hora de programar, se va a tomar un ejemplo para ver que metodología se debe emplear a la hora de poner en marcha el programa:

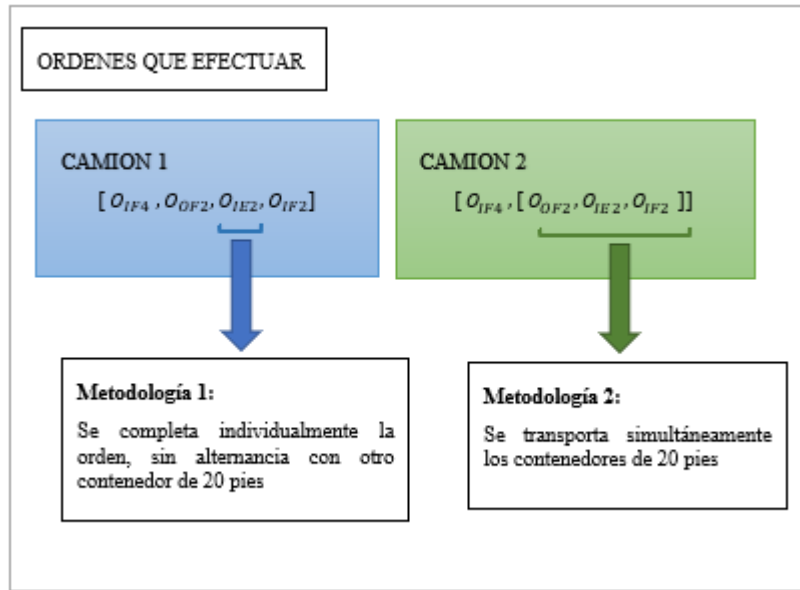


Figura 9: Metodología a emplear según la codificación de la orden

Como se puede contemplar en la figura anterior, la metodología 1 correspondería al modo de operación empleado en la primera versión, caracterizado por la independencia total entre órdenes. De este modo, un nuevo pedido no se inicia hasta que su predecesor no haya finalizado.

Ya que en otro apartado se vio con profundidad esta metodología, se va a analizar los casos que pueden aparecer con la metodología 2 y su planificación antes las diversas situaciones que se le plantean.

En primer lugar, había que ampliar la formulación de los estados ya que esta nueva adaptación del problema requería una descripción más precisa del estado del camión y mayor trazabilidad. Esto viene promovido por la necesidad de saber los estados intermedios del camión cuando transporta los contenedores de 20 pies simultáneamente con el fin de planificar su recogida y entrega. Así pues, se define los siguientes estados:

Tabla 9: Posibles estados de los camiones en la versión 2

Estado camión	
$CV_{20FREE}$	Contenedor de 20 pies vacío y liberado
$CV_{20}$	Contenedor de 20 pies vacío y solicitado para entrega
$CC_{20}$	Contenedor de 20 pies completo y solicitado para entrega
$CV_{40FREE}$	Contenedor de 40 pies vacío y liberado
$SC$	Sin contenedor

Como se ha comentado, son los pedidos de contenedores de 20 pies los que precisan mayor trazabilidad, de ahí a que aparezcan más estados relacionados con este tipo de unidades de carga. En cambio, los pedidos que entrañan unidades de carga de 40 pies sólo se necesita el estado inicial y el final de la orden. Esto viene promovido por su modo de operar como una caja negra dónde una vez asignado el estado del camión y localización iniciales, se fija toda la trayectoria establecida para el cumplimiento de dicho pedido. Además, esto es posible ya que no tiene que tener en cuenta la combinación con otros contenedores. Por otro lado, cabe destacar que los contenedores de 20 también podrán seguir actuando independientemente, esta versión no obliga que por su condición de tamaño tenga que ser compartido su transporte con otras unidades de 20 pies.

Por consiguiente, los escenarios posibles que se plantean ahora aumentan con las combinaciones de los contenedores de 20 pies. A continuación, se va a analizar cómo se planifica la recogida y entrega de los contenedores en función de la orden, estado y localización de los camiones.

Tabla 10: Posibles escenarios de recogida y entrega de órdenes de llegada completas de 20 pies

Orden	Acción	Estado inicial	Loc. inicial	Trayecto	Estado final	Loc. final
$O_{IF2}$	Recogida del contenedor en la terminal	$CV_{40FREE}$	$C_i$	$[C_i, D, T]$	$[CC_{20}, SC]$	$T$
		Si transporta sólo un contenedor o ninguno (SC)	$C_i$	$[C_i, T]$	El hueco libre pasa a ser ocupado por un contenedor completo $SC \rightarrow CC_{20}$	
			$D$	$[D, T]$		
			$T$	Se encuentra en la loc. final $[T]$		
	Si transporta algún contenedor ya liberado $CV_{20FREE}$ y el camión va completo	$C_i$	$[C_i, D, T]$	Si estado inicial $[CC_{20}, CV_{20FREE}]$ : $[CC_{20}, CC_{20}]$ En otros casos: $[CC_{20}, SC]$		
		$T$	$[T, D, T]$			
Entrega del contenedor a su cliente i	Transporta el contenedor completo $CC_{20}$	$C_i$	$[C_i, C_j]$	Se entrega la carga y se libera el contenedor $CC_{20} \rightarrow CV_{20FREE}$	$C_j$	
		$T$	$[T, C_j]$			

En cuanto a la tabla superior correspondiente a las órdenes de llegada de contenedores de 20 pies, se contempla por un lado la recogida de estos en la terminal y por otro, la entrega a su demandante. La primera conlleva el estudio de mayor número de casos ya que dependiendo del estado del camión y lo que transporte, deberá tomar una trayectoria específica.

Así pues, en lo relacionado con la recogida de material, si se traslada una unidad de carga de 40 pies liberada, habría que proceder a la descarga de este en el depósito desde la localización del cliente i. Lo mismo ocurriría en el caso de que el camión transportase dos contenedores de 20, desde su posición se debería de dirigir al mismo emplazamiento que en la situación anterior para descargar el contenedor o contenedores que fuesen ya liberados. En ambos casos, una vez depositada la carga libre, se moverán a la terminal a recoger el contenedor de la orden asignada. Cabe señalar que el estado final del camión en esta ocasión dependerá de la carga que lleve previamente, es decir, si al principio trasladaba un contenedor de 40 pies o dos de 20 pies libres, que han sido descargados en el depósito, al final contará con el contenedor completo de la orden que se lleva cabo. Sin embargo, en el caso restante que se estudia, además de llevar dicho contenedor cargará adicionalmente otro de una orden anterior que debe ser entregado en su destinatario.

Luego cuando se procede a la entrega de la unidad de carga, la programación únicamente implica que desde la localización que se encuentre se dirija directamente a la ubicación del cliente j. En otras palabras, no se debe analizar el estado inicial sino simplemente tener especial cuidado en actualizar el estado del camión quedándose dicho contenedor vacío y libre.

Tabla 11: Posibles escenarios de recogida y entrega de órdenes de salida completas de 20 pies

Orden	Acción	Estado inicial	Loc. inicial	Trayecto	Estado final	Loc. final
$O_{OF2}$	Carga del contenedor vacío en la ubicación del cliente $j$	$CV_{40FREE}$	$C_i$	$[C_i, D, C_j]$	$[CC_{20}, SC]$	$C_j$
		Si transporta sólo un contenedor o ninguno (SC) y no carga ninguno libre $CV_{20FREE}$	$C_i$	$[C_i, D, C_j]$	El hueco libre pasa a ser ocupado por un contenedor completo $SC \rightarrow CC_{20}$	
			$D$	$[D, C_j]$		
			$T$	$[T, D, C_j]$		
		Si transporta algún contenedor ya liberado $CV_{20FREE}$	$C_i$	$[C_i, C_j]$	$[CC_{20}, SC]$	
	$T$		$[T, C_j]$			
	Entrega del contenedor en la terminal	Transporta el contenedor completo $CC_{20}$	$C_j$	$[C_j, T]$	Se entrega el contenedor y queda un hueco libre en el camión $CC_{20} \rightarrow SC$	$T$

Ahora se analiza las órdenes que implican la exportación de contenedores por parte de un cliente  $j$ . De mismo modo que el ejemplo anterior, hay que dividir la planificación en dos. Particularmente este caso está compuesto por la carga del contenedor vacío en la ubicación del cliente demandante y posteriormente, su entrega en la terminal.

En primer lugar, la trayectoria será más directa en función del estado inicial del contenedor. Por ejemplo, si se traslada algún contenedor de 20 pies ya liberado el camión se ahorraría tener que ir en búsqueda de uno y consecuentemente iría directo a la localización del cliente  $j$ . En caso contrario, deberá dirigirse al depósito a recogerlo y seguidamente ya podría efectuar la carga del material de la dicha orden. Una vez cargado este, se actualizaría en estado y el contenedor libre pasaría a ser un contenedor lleno y ya solicitado.

En cuanto a la entrega del contenedor en la terminal, su planificación es más sencilla, el camión se va directamente a la terminal y se actualiza el estado del camión, donde una vez finalizada la orden se quedaría libre el emplazamiento destinado al contenedor entregado.

Tabla 12: Posibles escenarios de recogida y entrega de órdenes de llegada vacías de 20 pies

Orden	Acción	Estado inicial	Loc. inicial	Trayecto	Estado final	Loc. final
$O_{IE2}$	Carga del contenedor vacío en la ubicación del cliente j	$CV_{40FREE}$	$C_i$	$[C_i, D, T]$	$[CV_{20FREE}, SC]$	T
		Si transporta sólo un contenedor o ninguno (SC) y no carga ninguno libre $CV_{20FREE}$	$C_i$	$[C_i, T]$	El hueco libre pasa a ser ocupado por un contenedor vacío y solicitado $SC \rightarrow CV_{20FREE}$	
			$D$	$[D, T]$		
			$T$	Se encuentra en la loc. final $[T]$		
	Si transporta algún contenedor ya liberado $CV_{20FREE}$	$C_i$	No tendría que recoger ningún contenedor	El contenedor liberado pasaría a ser uno solicitado $CV_{20FREE} \rightarrow CV_{20}$		
		$T$				
Entrega del contenedor al cliente j	Transporta el contenedor vacío $CV_{20}$	$C_i$	$[C_i, C_j]$	Se entrega el contenedor y queda un hueco libre en el camión $CV_{20} \rightarrow SC$	$C_j$	
		$T$	$[T, C_j]$			

Por último, queda por analizar las órdenes que implican la importación de contenedores vacíos de 20 pies. Su dinámica es parecida a  $O_{IF2}$ , variando en algunos matices. Por consiguiente, si se transporta un contenedor de 40 este deberá ser almacenado en el depósito y seguidamente ya podría proceder a la recogida del contenedor vacío en la terminal. Otro caso posible sería que el camión tuviese hueco para la carga del contenedor y se dirigiera directo desde su localización a la terminal. Y finalmente, el caso óptimo a la hora de la planificación sería que el camión transportase un contenedor de 20 ya liberado de otra orden y efectivamente, en esta ocasión no hay que pasarse por la terminal ni pedir la importación a empresas externas de esta unidad de carga. Ya que la propia flota que se maneja podría proveer a este cliente de dicho contenedor. No se realizaría ningún trayecto adicional, sino que el contenedor libre pasaría a ser uno solicitado.

En lo referido a la entrega del contenedor, lo único que recalcar es el cambio de estado cuando se efectúa esta. De este modo, el camión pasaría a tener el hueco ocupado por el contenedor transportado libre.

Una vez comentado la dinámica que entraña la recogida y entrega de contenedores en las distintas órdenes presentadas, se profundiza en la planificación de aquellas órdenes de 20 pies que comparten trayecto. Es decir, cómo se decide que contenedor recoger o soltar primero. Para resolver esta cuestión, se toma como datos de entrada la lista que contiene las órdenes de 20 pies que se quieren efectuar. Además para asegurar la trazabilidad de los contenedores transportados se incorpora un conjunto de variables de estado, cuyo fin es informar de las acciones que se toman sobre el contenedor correspondiente a la orden asignada. A continuación, se muestra dichas variables locales:

Tabla 13: Variables locales del subprograma de asignación de las órdenes de 20 pies

<b>Variables locales</b>	
<b>'No<sub>rec</sub>'</b>	No recoger todavía el contenedor
<b>'C'</b>	Coger contenedor
<b>'S'</b>	Soltar contenedor
<b>'Final'</b>	Orden con dicho contenedor finalizada

De esta forma, según el estado del contenedor, el camión tomará un recorrido u otro. Así pues, con el fin de aclarar cómo se lleva a cabo el supuesto del “full-twin”, se muestra un ejemplo para ver la dinámica de asignación y descarga de contenedores de 20 pies.

<b>Combinación de órdenes de 20 pies</b>	$[O_{IE2}, O_{IF2}, O_{OF2}]$
<b>Clientes</b>	$[2, 1, 3]$
<b>Estados contenedores</b>	$['No_{rec}', 'No_{rec}', 'No_{rec}']$

En primer lugar, se asignarían las dos primeras ordenes de la lista, por lo que habría que actualizar el estado del contenedor. Inicialmente se recoge el contenedor de la orden que encabeza la lista y a continuación, el camión iría a la localización del segundo contenedor.

Posteriormente, el camión va lleno y habría que soltar los contenedores, así que esto conlleva seguir con la segunda parte esta metodología. En la segunda fase, la planificación estará condicionada por los estados de cada uno de los contenedores de 20 pies asignados.

Esquemáticamente la fase inicial se resume en la tabla inferior:

Tabla 14: Metodología de la fase inicial

<b>Metodología</b>	<b>Estado contenedor</b>
<b>1. Inicio</b>	$['No_{rec}', 'No_{rec}', 'No_{rec}']$
<b>2. Recogida del primer contenedor</b>	$['C', 'No_{rec}', 'No_{rec}']$
<b>3. Recogida del segundo contenedor</b>	$['S', 'C', 'No_{rec}']$
<b>4. Los dos contenedores ya se han recogido</b>	$['S', 'S', 'No_{rec}']$

Estos cuatro primeros pasos siempre se repiten independientemente de la dimensión de la lista de órdenes de 20 pies a combinar. El programa llegará a su fin, una vez que todos los contenedores hayan sido trasladados hasta su destinatario. Durante el acarreo de dichas unidades de carga, pueden aparecer tres escenarios diferentes que dependerá del estado de los contenedores asignados. Seguidamente se presenta dichos escenarios y su modo de actuación en cada uno de ellos:



- Si no hay ningún contenedor por recoger (C) y dos para soltar (S):

Se entregaría aquel contenedor que tardase menos tiempo en ser entregado y se actualizaría el estado de la orden a la que corresponda.

Tomando el ejemplo anterior, se descargaría el contenedor referente a la orden  $O_{IF2}$  y posteriormente, la primera orden que le siga en la lista y no haya sido recogida aún, pasará a ser cargada por el camión.

Tabla 15: Metodología de asignación de órdenes de 20 pies cuando  $S = 2$  y  $C = 0$

Metodología	Descripción	Estado contenedor
1. Se descarga aquella orden que tarde menos en entregarse	Se entregaría el contenedor de la segunda orden, ya que su localización es la más cercana $[O_{IE2}, O_{IF2}, O_{OF2}]$	Estado inicial: ['S', 'S', 'NO <sub>rec</sub> '] Actualización del estado: ['S', 'Final', 'NO <sub>rec</sub> ']
2. Se escoge la siguiente orden a recoger	El programa seleccionará el contenedor más próximo al entregado que esté sin recoger. En este caso coincide justo con la orden que le sigue $[O_{IE2}, O_{IF2}, O_{OF2}]$	Estado inicial: ['S', 'Final', 'NO <sub>rec</sub> '] Actualización del estado: ['S', 'Final', 'C']

- Si se transporta un contenedor para soltar (S) y hay a su vez se ha asignado la recogida de un contenedor (C):

Se impone la recogida antes que soltar el primer contenedor. Ya que, si se realizase primero la opción de soltar, no se estaría analizando el transporte combinado de ambos contenedores. Por consiguiente, en el ejemplo tomado se recogería el contenedor de la tercera orden de la lista y se actualizaría de nuevo el estado de los contenedores. Una vez finalizado este paso, habría que volver al primero descrito para continuar con el algoritmo.

Tabla 16: Metodología de asignación de órdenes de 20 pies cuando  $S = 1$  y  $C = 1$

Metodología	Descripción	Estado contenedor
1. Se carga el contenedor que fue asignado su recogida	El camión se dirige a la ubicación del contenedor que debe ser recogido $[O_{IE2}, O_{IF2}, O_{OF2}]$	Estado inicial: ['S', 'Final', 'C'] Actualización del estado: ['S', 'Final', 'S']

- Si todas las órdenes están completadas excepto una por efectuar su entrega (S):

Efectivamente, sería el último paso a completar por el camión en cuanto a este acarreo particular dónde se puede efectuar varias órdenes a la vez. Por tanto, se procede a soltar el contenedor restante y con esto, finalizaría la asignación de entrega y recogidas de contenedores.

Tabla 17: Metodología de asignación de órdenes de 20 pies cuando  $S = 1$  y  $C = 0$ 

Metodología	Descripción	Estado contenedor
1. Se entrega el contenedor de la única orden que queda por finalizar	Todas las órdenes de la lista han sido completadas excepto una que sólo queda depositar su contenedor en el emplazamiento asignado $[O_{IE2}, O_{IF2}, O_{OF2}]$	Estado inicial: $['Final', 'Final', 'S']$ Actualización del estado y condición necesaria para salir del bucle: $['Final', 'Final', 'Final']$

### 3.4.5 Versión 3: Cada camión puede llevar varios contenedores, limitado por tamaño y peso.

En esta versión se incorpora una nueva restricción, la limitación del peso cargado por el camión. De este modo, habrá que tener en cuenta este aspecto a la hora de combinar los contenedores de 20 pies que son transportados simultáneamente. Consecuentemente, tendrá lugar un menor número de soluciones posibles a lo largo de la resolución del algoritmo aplicado promovido por esta nueva restricción.

Para incluir el factor peso, se buscó el límite máximo permitido según el tamaño de la unidad de carga y así poder imponer el rango, a la hora de programar, de las toneladas que se podrá transportar. A continuación, se muestra los datos obtenidos:

Tabla 18: Capacidad máxima por contenedor

	Contenedor 20 pies	Contenedor 40 pies
<b>Tara</b>	2.300 kg	3.940 kg
<b>Carga máxima</b>	28.180 kg	28.560 kg
<b>Peso bruto</b>	30.480 kg	32.500 kg

Según el artículo “*Multi-size container transportation by truck: modeling and optimization*” (Zhang et al., 2015), en algunos países no se debe violar un límite de peso de 26 toneladas para los contenedores transportados por un solo camión. Por tanto se aplicó este límite de peso al problema y con esta nueva incorporación, se tuvo que plantear una nueva metodología para que aquellas soluciones donde se excedía el peso por camión no fuesen escogidas. Por consiguiente, en aquellos casos donde no se cumplía la condición del peso máximo, se le imputaba un valor de la función objetivo a la solución total de 0 que luego sería rechazada su elección por tener ese valor nulo. Respecto a la planificación de las trayectorias, se sigue empleando la dinámica y programación establecida en la versión 2.

Tabla 19: Posibles escenarios a la hora de combinar dos contenedores de 20 pies limitado por el peso

<b>Solución camión:</b> <b><math>[O_{IF4}, [O_{OF2}, O_{IE2}, O_{IF2}]]</math> Pesos (ton): [24, [10, 12, 16]]</b>	
Combinación de órdenes de 20 pies	Solución APTA
<p style="text-align: center;"><b><u>CASO 1</u></b></p> <p>Primero combina los dos primeros contenedores y no excede la carga.</p> <p style="text-align: center;"><b><math>[O_{OF2}, O_{IE2}]</math>: 22 ton</b></p> <p>Después suelta el contenedor de la segunda orden, ya que es el más cercano y seguidamente recoge el contenedor de <math>O_{IF2}</math></p> <p style="text-align: center;"><b><math>[O_{OF2}, O_{IF2}]</math>: 26 ton</b></p> <p>Tampoco supera el límite, por lo tanto, el camión puede combinar las tres órdenes de 20 pies</p>	SI
<p style="text-align: center;"><b><u>CASO 2</u></b></p> <p>Otro escenario sería el siguiente:</p> <p>Como el ejemplo anterior, primero transporta los dos primeros.</p> <p style="text-align: center;"><b><math>[O_{OF2}, O_{IE2}]</math>: 22 ton</b></p> <p>En esta ocasión, suelta el primer contenedor y recoge el contenedor de la orden sobrante:</p> <p style="text-align: center;"><b><math>[O_{OE2}, O_{IF2}]</math>: 28 ton</b></p> <p>El peso neto sí supera el límite, así pues, esa solución no podría ser factible.</p>	NO

# 4 METODOLOGÍA DE RESOLUCIÓN

## 4.1 Los métodos de resolución de problemas de transporte

Basándonos en Lüer et al. (2009) “el problema de ruteo de vehículos (VRP) es el nombre genérico dado al conjunto de problemas cuya premisa es determinar una serie de rutas para una flota de vehículos que parten de un depósito central y atienden a un cierto número de clientes geográficamente dispersos, de manera que se minimice el costo de transporte. Surge naturalmente como el problema central en los campos de transporte, distribución y logística”.

Cabe destacar que, en algunos mercados, el transporte significa gran parte del valor de los bienes. Asimismo, VRP se encuentra entre los problemas más populares y desafiantes en la programación lineal entera, cuya complejidad de es NP-completo. De ahí que el tiempo y esfuerzo computacional para resolverlo se incrementa exponencialmente respecto al tamaño del problema.

Diferentes métodos han sido planteados para la resolución de los problemas VRP, los cuales se congregan en dos grupos diferenciados, exactos y aproximados. A continuación, se profundiza en dichos conjuntos, analizando los más conocidos o empleados de cada uno de estos.

Los métodos exactos implementados son más apropiados para problemas pequeños, no sería efectivos para problemas de dimensiones mayores debido a la complejidad que conlleva. Para estos, se propone en mayor medida los métodos heurísticos, a través de los cuales se puede obtener con rapidez soluciones aproximadas suficientemente buenas y factibles en la toma de decisiones.

### 4.1.1 Métodos exactos

Según lo dispuesto por Lüer et al. (2009):

“Son aquellos que parten de una formulación como modelos de programación lineal (enteros) o similares, y llegan a una solución factible (entera) gracias a algoritmos de acotamiento del conjunto de soluciones factibles.”

Dentro de este grupo, destacan el Branch & Bound (B & B), Branch and Price (B&P) y Branch and Cut (B&C).

#### 4.1.1.1 Branch & Bound

Es el algoritmo de ramificación y acotación que lleva a cabo una sistemática enumeración de las soluciones. Tal como expone Jaque (2008), B & B evalúa los subconjuntos de la solución considerando su contribución a la función objetivo. Para ello se establece unas cotas inferiores y superiores para cada problema, y según las cotas de cada posible subconjunto de solución, se concluye si se ramifica o no el árbol de soluciones.

En definitiva, la estructura general engloba estos tres puntos:

- Un criterio para fragmentar los subconjuntos aspirantes a abarcar la solución óptima hallados en cada fase.
- El cálculo de una cota (inferior o superior) para los valores de la función en cada subconjunto.
- Un criterio que opte por un subconjunto para su posterior partición.

En la siguiente figura recogida en Capelle et al. (2012), se muestra un árbol de ejemplo acompañado de una tabla con las soluciones relajadas correspondientes a los subconjuntos estudiados:

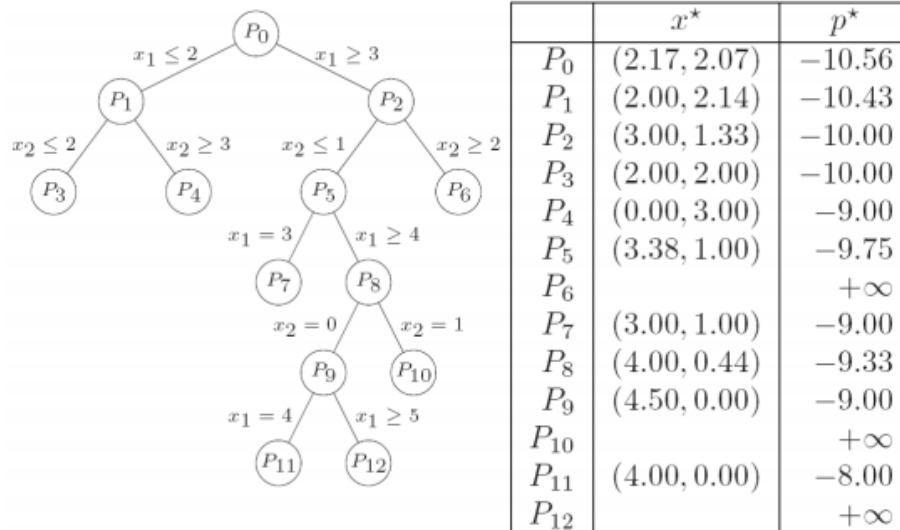


Figura 10: Ejemplo de árbol Branch and Bound. Fuente: Capelle et al. (2012)

#### 4.1.1.2 Branch & Price

Según Barnhart et al. (1998), la filosofía de Branch and Price es similar a la anterior estudiada de ramificación y corte, excepto que el procedimiento se centra en la generación de columnas en lugar de la de filas. De hecho, la fijación de precios y el corte son procedimientos complementarios para ajustar la relajación de un LP.

En esta metodología, los conjuntos de columnas quedan fuera de la relajación del LP ya que hay demasiadas columnas para manejar de forma eficiente y para la mayoría de éstas la variable asociada en la solución óptima toma el valor de cero, el algoritmo B & P considera una relajación del problema con sólo un subconjunto de éstas.

Tomando como fundamento Maya (2008): “Mediante la implementación del problema auxiliar (Pricing Problem) se generan las columnas que deben adicionarse a la base hasta dar solución a la relajación del problema. En caso contrario, la ramificación (Branching) tendría lugar una vez que no haya columnas para ingresar en la base y la solución del problema relajado no satisface las condiciones de integralidad. En el caso en el cual la solución óptima del Problema Maestro Inicial es entera, ésta corresponde también a la solución óptima del problema no relajado, es decir, para el problema de la formulación desagregada”.

En cambio, si la solución de la relajación del problema no satisface las restricciones de integralidad, se procede a la ramificación en dos o más subproblemas, que constituyen parte del conjunto de subproblemas activos.

En definitiva, este algoritmo es una generalización de Branch & Bound con relajaciones en LP, que permite la generación de columnas a través del árbol de B & B.

#### 4.1.1.3 Branch & Cut

Según Ramusio y Marengo (2010), el algoritmo también conocido como ramificación y corte surge como un híbrido de los métodos Branch & Bound y los métodos de planos de corte. En términos simple, el método resuelve el programa lineal sin la restricción entera utilizando el algoritmo Simplex regular.

La idea consiste en generar desigualdades válidas violadas a lo largo de todo el árbol de Branch and Bound y no sólo en el nodo raíz. Si después de resolver la relajación lineal de un subproblema no es posible cerrar el nodo correspondiente, se busca una desigualdad violada por el óptimo de la relajación. Si esta búsqueda es efectiva y se encuentran desigualdades violadas (cortes), se agregan a la formulación y se retoma la resolución del problema lineal de nuevo. En caso de no hallar ningún corte, se prosigue el proceso de branching.

#### 4.1.2 Métodos aproximados

Anteriormente se destacó la complejidad computacional de los problemas VRP (NP-completo). Así pues, la resolución mediante algoritmos exactos supone aumentar esta complejidad más aun, debido al aumento de tiempo y recursos que requerirían. De este modo, aparece una mejor alternativa de la mano de los métodos

aproximados. Es cierto que dichos métodos no suelen encontrar la solución óptima, pero si una muy cercana a ella y, sobre todo, con un menor empleo de recursos y tiempo. Es decir, se sacrifica no llegar al óptimo a cambio de poder resolver problemas de gran tamaño con un elevado número de variables y datos disponiendo de un menor tiempo computacional.

#### 4.1.2.1 Heurísticas

Tal como expone Olivera (2004), “son procedimientos simples que llevan a cabo una exploración limitada del espacio de búsqueda, dando así soluciones de calidad tolerable en tiempo generalmente moderados. Estos procedimientos tendrían margen de mejora utilizando métodos de búsqueda más sofisticados, pero arrastrando consigo altos tiempos de ejecución”.

En función de la labor que lleven a cabo, según lo visto en Lüer et al.(2009), las heurísticas para el problema de rutas de vehículos pueden clasificarse en:

- Constructivas: se va agregando componentes individuales a la solución preliminar hasta conseguir una solución final factible. En este grupo de las más destacadas es la heurística de ahorros, donde se formulan  $n$  rutas factibles y se prueba acoplar una ruta que finaliza en  $i$  con otra que parte en  $j$ , añadiendo el arco  $[i, j]$  y calculando así el ahorro de cada posible movimiento. También se encuentra en este grupo el algoritmo de pétalos.
- De mejora: al contrario que en las constructivas, se trabaja sobre una solución factible. En este campo se encuentra las del tipo intra-ruta que mueve arcos dentro de una misma ruta, por ejemplo, la heurística de Lin-Kernighan y, por otro lado, están las de extra-ruta donde se intercambian entre dos o más rutas distintas.
- Técnicas de relajación: métodos asociados a la programación lineal entera. La más destacable en este grupo es la denominada Relajación Lagrangeana, que consiste principalmente es un método de descomposición basado en descomponer un problema original restringido, de primeras complejo de resolver, para reemplazarlo por otro problema que permita simplificar la resolución.

A continuación, se va a recopilar las heurísticas clásicas más significativas empleadas en los problemas de transporte.

#### El Algoritmo de Ahorros

Apoyándose en Olivera (2004), el algoritmo presentado en Clarke y Wright (1964) es uno de los más populares para la resolución del VRP. Así pues, ante una solución con dos rutas diferentes  $(0, \dots, i, 0)$  y  $(0, j, \dots, 0)$ , estas pueden ser combinadas constituyendo una nueva ruta  $(0, \dots, i, j, \dots, 0)$ . Con esta unión se busca un ahorro, en este caso en distancia, siendo este el siguiente:

$$s_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$$

En la fórmula superior se contempla que el ahorro en la nueva solución se caracteriza por no utilizar los arcos  $(i, 0)$  y  $(0, j)$  y agregar el arco  $(i, j)$ . En definitiva, este algoritmo parte de la solución inicial y tomarán las uniones que proporcionen mayores ahorros y a su vez no violen las restricciones del problema. Dentro de este se distingue dos versiones, una en la que se trabaja sobre todas las rutas simultáneamente y otra secuencia que conforma las rutas de una a una por vez.

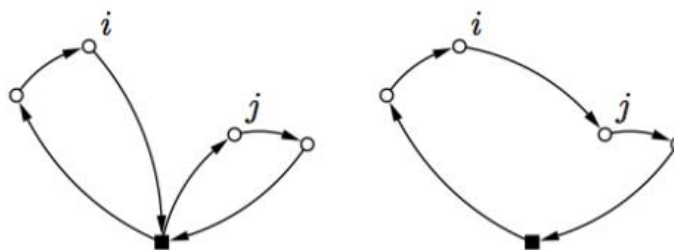


Figura 11: Combinación de dos rutas difentes en una sola. Fuente: Olivera (2004)

### Algoritmo de pétalos

Tomando como fundamento a Carbonel (2015), este algoritmo es una heurística empleada para la resolución de problemas de VRP, donde se trabaja con dos fases, la primera la asignación del ruteo y seguidamente la agrupación. Partiendo de la disposición de un conjunto de rutas  $R$ , siendo cada ruta  $r \in R$  factible, pero a su vez cada cliente es visitado por diversas rutas. Así pues, el fin del problema es optar por un subconjunto de  $R$  que minimice el coste y visite exactamente una vez a cada cliente.

Tal como expone Olivera (2004), dicho problema se podría formular como un Set Partitioning Problem (SPP):

$$\begin{aligned} & \min \sum_{k \in R} c_k x_k \\ \text{s. a. } & \sum_{k \in R} a_{ik} x_k = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \\ & x_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in S \end{aligned}$$

Así pues, la variable  $a_{ik}$  toma el valor 1 si el cliente  $i$  es visitado por la ruta  $r_k$  y 0 si es el caso contrario, donde  $c_k$  correspondería al costo de dicha ruta. En cuanto a la variable  $x_k$ , denota si la ruta  $r_k$  es seleccionada en la solución final. Si tiene lugar que el conjunto de  $R$  contenga todas sus rutas factibles, resolver el SPP supondría solucionar dicho problema de forma exacta.

### Algoritmo de Lin-Kernighan

Tal como expone Bautista y Pereira (2003), la heurística de Lin y Kernighan se basa en la aplicación concatenada de intercambios simples que proporciona una exploración más amplia del espacio de soluciones que la que se lleva a cabo con la aplicación iterativa de dichos intercambios.

Se trata de un problema que surge al aplicar  $\lambda$ -intercambios y en el que se debe fijar el valor de  $\lambda$  de antemano. Acorde con Olivera (2004), dada una ruta, el objetivo es fijar dos conjuntos de arcos  $\{x_1, \dots, x_k\}$  e  $\{y_1, \dots, y_k\}$ , de forma que su intercambio decremente el costo de la solución. Además, los arcos  $x$  deben ser parte de la ruta, ambos conjuntos deben ser disjuntos y a más inri, al eliminar los arcos de  $x$  y agregar los de  $y$  se debe crear una ruta cerrada.

Por tanto, la metodología a seguir comenzaría eligiendo un arco  $x_1 = (v_1, v_2)$ . Seguidamente se busca  $y_2 = (v_2, v_3)$  de tal manera que  $cx_1 - cy_1 = c_{v_1, v_2} - c_{v_2, v_3} > 0$ . Al comienzo de la iteración  $i$ , ya se ha elegido  $x_1 \dots x_{i-1}$  e  $y_1 \dots y_{i-1}$ , donde  $x_h = (v_{2h-1}, v_{2h})$  e  $y_h = (v_{2h}, v_{2h+1})$ . Se busca que ahora  $x_i$ , de manera que si se uniera  $v_{2i}$  con  $v_1$  diese lugar una ruta cerrada, asegurando así que se finalice el proceso con una solución factible. Como  $v_{2i-1}$  ya fue establecido al seleccionar  $y_{i-1}$  y  $x_i$  tiene que ser un arco de la ruta, aparecerían dos opciones para  $v_{2i-1}$  que corresponden con el arco anterior a  $v_{2i-1}$  en la ruta y el siguiente a él, sin embargo únicamente una cerraría la ruta a ser unida con  $v_1$ . Como consecuencia,  $y_{i-1}$  determina la variable  $x_i$ . Por último, para seleccionar  $y_i$ , no debe cumplirse que  $y_i \in \{x_1, \dots, x_k\}$  para que se corrobore que los conjuntos son disjuntos y también, para que no se empeore la situación se debe dar  $\sum_{j=1}^k c_{x_j} - c_{y_j} > 0$  y además poder elegirse el siguiente  $x_{i+1}$ . En caso contrario de no poder escoger  $y_i$  que satisfaga todo lo anterior, se busca  $k$  tal que  $\sum_{j=1}^k c_{x_j} - c_{y_j}$  sea máximo y se intercambian los arcos  $\{x_1, \dots, x_k\}$  e  $\{y_1, \dots, y_k\}$ .

#### 4.1.2.2 Metaheurísticas

Los profesores Osman y Kelly (1995) introducen la siguiente definición:

“Los procedimientos Metaheurísticos son una clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son efectivos. Los Metaheurísticos proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los mecanismos estadísticos.”

Tal como expone Lüer et al. (2009), una metaheurística es un estrategia (heurística) general aplicable a una gran variedad de problemas para los que existe un algoritmo confiable de resolución. Esto último puede ser motivado por la complejidad del problema a resolver o simplemente por la falta de estudios sobre el problema. Este conjunto de algoritmos tiene un rol determinante en la Investigación de Operaciones dando resultados muy cercanos al óptimo y están basados en la observación de la naturaleza, le evolución biológica, procesos físicos,

etc.

Acorde con Dréo et al. (2006), se puede destacar una de las principales características de las metaheurísticas es la capacidad de prestación a todo tipo de extensiones. En particular:

- Optimización multiobjetivo, donde se trata de optimizar varios objetivos contradictorios de forma simultánea
- Optimización multimodal, donde se esfuerza por localizar un conjunto completo de óptimos globales o locales
- Optimización dinámica, enfrentándose a variaciones temporales de la función objetivo
- El recurso a implementaciones paralelas

A continuación, se expone algunas de las metaheurísticas más comunes aplicadas en los problemas de transporte.

### Algoritmos Genéticos

Corresponden a una clase de los algoritmos evolutivos, los cuales están basados en el proceso de la evolución natural donde los individuos que sobreviven son aquellos que poseen mayor capacidad de adaptación, mientras que por otro lado los más débiles son propensos a la extinción. Estos algoritmos han sido novedosos en la resolución de problemas de rutas de vehículos, así como de localización y cobertura, entre muchos otros.

Siguiendo lo anterior, según Olivera (2004), los Algoritmos Genéticos (AG) en general trabajan con patrones de codificación que represente de las soluciones, como vectores, matrices o árboles. Actúa sobre una población  $P$  de soluciones codificadas, denominadas individuos. Así pues, cada individuo  $i \in P$  será evaluado por su función fitness  $f(i)$ , donde cuanto mayor sea el valor fitness de un individuo, mejor será su solución.

En cuanto a su metodología, en cada iteración los operadores evolutivos se combinan y modifican para generar nuevos individuos. De esta forma, dichos individuos son agregados a la población, contribuyendo a escapar de mínimos locales.

Usualmente se opera en tres fases:

- **Selección:** este operador es el encargado de la elección de ciertos individuos de la población que tendrán la posibilidad de reproducirse. De este modo, se podría decir que este operador da lugar a una población intermedia cuya cuantía de individuos depende de las características del operador de cruzamiento empleado. Por otra parte, los operadores de selección son probabilísticos dando normalmente mayor privilegio a aquellos individuos con mayor fitness. En cuanto a los tipos de operadores dentro de este conjunto, se encuentra el de Selección Proporcional donde la probabilidad de elegir al individuo  $i$  es proporcional a  $f(i)$ . Pero también está los operadores basados en el azar, denominados Selección por Torneo, en los cuales se toma un conjunto aleatorio y se escoge aquellos con mayor fitness.
- **Cruzamiento:** ya generada la población intermedia, se lleva a cabo repetidas veces el operador de cruzamiento, cuyo objetivo es combinar individuos de dicha población para poder así generar una nueva solución. Normalmente se toma dos individuos  $p_1$  y  $p_2$  llamados padres y estos dan lugar a dos individuos  $h_1$  y  $h_2$  denominados hijos a través de la aplicación de una regla probabilística
- **Mutación:** para finalizar un operador probabilístico de mutación es aplicado sobre ciertos individuos para conformar una nueva población mediante alguna modificación a estos. Por ejemplo, en codificaciones con vectores binarios suele invertirse algunos bits o permutar los valores de dos posiciones. Cabe destacar que a cada una de las poblaciones sucesivas se les llama generación.

### Genetic Vehicle Representation (GVR)

En GVR se trabaja directamente sobre las soluciones. Tal como presenta Pereira et al. (2002), una solución candidata a un problema de CVRP (Capacitated Vehicle Routing Problem) debe especificar el tamaño de la flota, la división de la demanda a través de todos los vehículos y el orden de entrega para cada ruta. Con este algoritmo se adopta una representación donde el material genético de un individuo contiene varias rutas, las cuales se componen de un subconjunto ordenado de clientes. También todas las demandas que pertenecen al problema deben ser satisfechas, es decir, deben estar presentes en una de las rutas. A continuación, se muestra un ejemplo del cromosoma GVR:





Figura 12: Ejemplo del cromosoma GVR

A lo largo del proceso, algunas rutas en el cromosoma pueden provocar un exceso de la capacidad de un vehículo. Si esto se produce, para garantizar que la interpretación de una solución válida, se divide la ruta que excede la capacidad en varias de ellas. Cabe destacar que estos cambios sólo se producen en el nivel de interpretación de la solución y, por tanto, la información codificada en el cromosoma no es alterada. En cuanto al cruzamiento de dos soluciones  $p1$  y  $p2$ , según lo expuesto por Olivera (2004) :

1. Se toma una sub-ruta  $r = (v_1, \dots, v_k)$ , destacando que no es necesario que parta y recoja en el depósito ya que se trata de una sub-ruta.
2. Se determina el cliente  $w_i$  más cercano a  $v_1$  que no está en  $r$ . Si la ruta a la que pertenece  $w$  en la solución  $p2$  es  $r' = (0, w_1, \dots, w_j, w_{j+1}, \dots, 0)$ , entonces esta es remplazada por  $(0, w_1, \dots, w_j, v_1, \dots, v_k, w_{j+1}, \dots, 0)$ . En definitiva, se inserta  $r$  en  $r'$  a continuación de  $w_j$ .
3. Si esta ruta no fuera factible, como se ha comentado anteriormente, se divide dicha ruta en tantas rutas factibles como fuese necesario.

Con estos pasos se genera un hijo, el otro es una copia de  $p1$ . En cuanto a la mutación se emplean cuatro operadores cuya función es la siguiente:

- Intercambiar la posición de dos clientes en una ruta
- Invertir el orden de una ruta
- Reinsertar un cliente en una ruta distinta a la que pertenecía
- Seleccionar una sub-ruta y asignarla en otro emplazamiento de la solución

### Recocido simulado

Tomando como fundamento a Lüer et al. (2009), el recocido simulado toma como semejanza “el proceso de manufactura donde un material (metal) es calentado hasta altas temperaturas, para luego ser enfriado lentamente”. Así, sus estructuras cristalinas se reorganizan en la configuración de mínima energía.

En cuanto a la hora de programar, la temperatura es un parámetro discreto y para llevar a cabo una analogía con la situación física, se admite soluciones peores que la mejor encontrada hasta el momento con el fin de escapar de óptimos locales. La aceptación de estas soluciones se aplica en base a una probabilidad proporcional a la distribución termodinámica de Boltzmann.

Es un método de trayectoria que se caracteriza por una implementación sencilla, y cuenta con varios parámetros donde su calibrado es importante para buscar mejoras, como puede ser el patrón de enfriamiento o la probabilidad de aceptar una peor solución.

Más adelante se profundizará más en este algoritmo, ya que ha sido implementado para la resolución del problema a tratar en este trabajo y cuyas soluciones servirán para comparar los resultados obtenidos con la Búsqueda Tabú.

### Búsqueda Tabú

Se encuentra dentro de los algoritmos más populares de búsqueda local, los cuales son métodos de mejora iterativa donde se parte de una solución inicial y una estructura de vecindario. A medida que avanza, de manera iterativa, se explora los vecindarios con el fin de contribuir a la mejora de la función objetivo y evitar ser atrapado en un óptimo local.

Tal como recoge Barbarosoglu y Ozgur (1999), es un procedimiento iterativo de meta estrategia basado en la construcción de un vecindario ampliado propuesto inicialmente por Glover. En resumidas cuentas, consiste en explorar el espacio de búsqueda pasando de una solución a su mejor vecino, aunque ello suponga un deterioro del valor objetivo de la función. Así se aumenta la probabilidad de escapar de un óptimo local. Para evitar que se forme ciclo, las soluciones que han sido seleccionadas recientemente se convierten en tabú, es decir, se prohíbe la elección de dicho movimiento durante un cierto número de iteraciones siguiendo la metodología FIFO. Esto último evita caer en soluciones ya exploradas y caracteriza a este algoritmo por tener “memoria”, esta puede ser a corto como a largo plazo. El primer tipo de memoria pertenece a la etapa de intensificación y tiene en cuenta no coger los movimientos almacenados en la lista tabú, en cambio el segundo permite llevar a

cabo una diversificación del problema hacia zonas inexploradas, penalizando las soluciones seleccionadas por la frecuencia con la que han sido seleccionadas.

Generalmente dentro del contexto del VRP, una práctica común es la de definir a un vecino mediante el intercambio de vértices entre diferentes rutas, la sustitución de vértices por una ruta diferente o dentro de su propia ruta, la creación de una nueva ruta o la eliminación de una ruta existente.

Más adelante, se hará un estudio más exhausto sobre esta metodología ya que es la que se emplea en resolución del problema de acarreo terrestre que se estudia ente trabajo.

### **Colonias de hormigas**

“El algoritmo inspirado en el comportamiento comunitario de las hormigas permite aprovechar el éxito que tienen estos esquemas biológicos aplicándolos en la búsqueda de soluciones para problemas complejos de optimización como el VRP” (Jaque, 2008).

Según lo expuesto por Lüer et al. (2009), se basa en la naturaleza dónde un conjunto de hormigas exploran diversas direcciones del espacio de soluciones factibles, dejando tras de sí un rastro de feromonas a través de las cuales indica a la siguiente hormiga las direcciones de mayor interés para ser exploradas que toma con una probabilidad proporcional al nivel de feromona existente. De este modo se intenta evitar caer en un óptimo local. Adicionalmente, los niveles de feromonas disminuyen tras cada iteración. Por consiguiente, al trabajar con distintos agentes se podría considerar un algoritmo basado en poblaciones.

### **Enjambre de partículas (PSO)**

También conocida por sus siglas en inglés PSO (Particle Swarm Optimization), se trata de un algoritmo basado en la población fundamentado en el comportamiento de un grupo de organismos que trabajan juntos con el fin de buscar la mejor posición, cuyo análogo en el problema sería la mejor solución al problema. Sus implementaciones han tenido buenos resultados en la solución del VRP

De acuerdo con Jin et Kachitvichyanukul (2009), la solución al problema está representada por la posición multidimensional de una partícula. En cada iteración de PSO, cada partícula se mueve desde su posición original a una nueva basada en su velocidad, donde esta está influenciada por la información cognitiva y social de las partículas. De este modo, la información cognitiva de una partícula corresponde con la mejor posición visitada hasta el momento, es decir, la posición que ofrece la mejor función objetivo para dicha partícula. Por otra parte, la información social viene ligada a la mejor posición global que ha sido visitada por el conjunto de partículas del enjambre.

## **4.2 La Búsqueda Tabú**

En el apartado anterior se introdujo brevemente esta metaheurística, la cual ha sido escogida para la resolución del problema de acarreo terrestre estudiado. Según Glover (1989), la búsqueda tabú es una estrategia para resolver problemas de optimización combinatoria, con la capacidad de hacer uso de muchos otros métodos, tales como algoritmos de programación lineal y heurística especializada, y a los cuales dirige para superar las limitaciones de la optimización local.

Acorde con Martí (2003), Tabu Search (TS) es una técnica para resolver problemas combinatorios de gran dificultad fundamentada en principios generales de Inteligencia Artificial (IA). Principalmente, se trata de un metaheurístico que puede ser empleado para guiar cualquier procedimiento de búsqueda local en la búsqueda estratégica del óptimo del problema, donde se evita que la exploración quede atrapada en un óptimo local. De ahí la toma del concepto de memoria de la IA, cuya implementación se aplica en estructuras simples con el fin de dirigir una búsqueda efectiva teniendo en cuenta la historia de esta. Por consiguiente, dicho de otra manera, esta búsqueda trata de extraer información de lo acontecido y tomar decisiones en base a ello.

Así pues, tal como expone Dréo et al. (2006), el desarrollo de esta búsqueda traza un par de retos, en primer lugar, como en cualquier búsqueda iterativa, es indispensable que el mecanismo de evaluación de soluciones vecinas sea eficaz. Por otro lado, es importante trasladar todo el conocimiento que se tiene sobre el problema en cuestión al procedimiento de búsqueda, para así evitar que se quede atrapado en regiones malas del espacio de solución.

Para llevar a cabo esa búsqueda inteligente, una de las principales herramientas será la de proporcionar memoria adaptativa a la búsqueda. Dicha memoria permite:

- Restringir el entorno de la búsqueda
- Incorporar mecanismos para reiniciar la búsqueda a través de intensificación sobre zonas del espacio de exploración ya visitadas, o, por otro lado, optar por la diversificación sobre zonas del espacio que apenas o nunca han sido visitadas

Para describir el funcionamiento de la búsqueda tabú, se presenta el siguiente problema de optimización combinatoria:

$$\text{Minimize } c(x): x \in X \text{ in } R_n$$

La función  $c(x)$  puede ser lineal o no lineal, y la condición  $x \in X$  limita los componentes de  $x$  a valores discretos. En algunos escenarios el problema (P) puede representar alguna modificación de algún problema original,  $X$  es un superconjunto de los vectores que normalmente se califican como soluciones factibles, y, por último,  $c(x)$  es una función de penalización, diseñada para asegurar que las soluciones óptimas del problema (P) también son óptimas para el problema del cual derivó.

## 4.2.1 Fundamentos

### 4.2.1.1 Búsqueda por entorno

La búsqueda tabú toma como referencia a la búsqueda por entornos, aunque esta última entraña un significado más amplio en la búsqueda tabú que en otras estrategias metaheurísticas.

En este apartado se presenta una serie de conceptos característicos de los métodos de búsqueda para luego profundizar en los específicos de la búsqueda tabú. Para ello se ha tomado como referencia a Riojas (2005).

- En un problema P de optimización combinatoria se emplea  $x$  para denotar el conjunto de soluciones factibles y  $c$  para la función objetivo
- Dichas soluciones poseen un conjunto de posibles soluciones asociadas, que toma el nombre de entorno o vecindario de  $x$  y se denota como  $N(x)$
- Cada solución del entorno puede alcanzarse directamente desde  $x$  a través de una operación denominada movimiento
- La solución inicial  $x_0$  se generará según el algoritmo empleado para ello o simplemente al azar. Es decir, se podrá usar una heurística con el fin de partir de una buena solución o simplemente generar aleatoriamente una solución.

De este modo en un procedimiento de búsqueda local se parte de una solución inicial  $x_0$ , se calcula su vecindario  $N(x_0)$  y seguidamente entre las soluciones posibles se selecciona una nueva solución  $x_1$ , la cual ha sido resultado de realizar un movimiento a la solución inicial. Esta selección se llevará a cabo de acuerdo con un criterio de selección preestablecido.

En cuanto a los criterios de selección, no existe un único medio para la elección de la solución nueva. El criterio más popular es el de escoger aquella solución que proporcione una mejor evaluación de la función objetivo, así dando lugar a una solución mejor que la actual. Dicho criterio se conoce como *greedy* y permite optimizar la solución mientras se pueda.

Por último, la aplicación de un método de búsqueda puede acarrear dos problemas:

1. El algoritmo puede ciclar, volviendo a visitar soluciones ya escogidas en iteraciones anteriores. Consecuentemente, se debe incorporar un mecanismo que impida tal hecho.
2. El algoritmo podría iterar indefinidamente, para ello hay que imponer un criterio de parada.

### 4.2.1.2 Una forma simple de la Búsqueda Tabú

En la búsqueda tabú básica se puede asumir que el problema a resolver se puede formular de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \min f(s) \\ s \in S \end{aligned}$$

Donde en esta formulación  $f$  denota la función objetivo,  $s$  una solución factible dentro del conjunto  $S$  de

soluciones factibles.

Esta búsqueda tabú presenta dos elementos clave, restringir la búsqueda clasificando algunos de sus movimientos como prohibidos (es decir, tabú), y también, liberar la búsqueda por un corto período de tiempo. En las siguientes secciones se introduce las bases el procedimiento, exponiendo la doble relación entre el tabú y las restricciones y los criterios de aspiración como medio para limitar y guiar el proceso de búsqueda. Y se presenta el uso de la memoria a medio y largo plazo, funciones que operan en contrapunto a la función de memoria a corto plazo.

## 4.2.2 Estructura de la búsqueda tabú

### 4.2.2.1 El vecindario

Este algoritmo se inicia de igual modo que cualquier procedimiento que se base en la búsqueda local. Como se ha comentado anteriormente, tras cada iteración una solución  $x_i$  se transforma en  $x_{i+1}$  perteneciente al entorno  $N(x)$  de la primera. En cambio, en la mayoría de los casos el vecindario puede ser muy grande, conllevando un elevado esfuerzo computacional. Es por eso que la búsqueda tabú trabajará con un entorno reducido  $N^*(x)$ , donde se toma un cierto número de soluciones factibles dentro del entorno de  $x$  que serán candidatas para ser seleccionadas como solución. Esto se podría expresar de la siguiente forma:

$$N^*(x) \subseteq N(x)$$

Tomando como base el artículo de Martí (2003), hay múltiples maneras de definir el entorno reducido de una solución. La más sencilla y la que se va a llevar a cabo en la implementación de este algoritmo, consiste en etiquetar las soluciones ya visitadas en un pasado cercano como tabú. Este criterio aplica por tanto la memoria a corto plazo, de la cual se hablará más adelante. Así pues, en cada iteración se obtendría el siguiente vecindario, excluyendo aquellas soluciones consideradas como tabú y evitando en cierta manera que al algoritmo cicle:

$$N^*(x) = N(x) \setminus T$$

### 4.2.2.2 La lista tabú

La lista tabú es una lista donde se encuentran registradas las soluciones o atributos de dichas soluciones que no deben ser escogidas a lo largo del proceso de búsqueda. Cabe destacar que se trata de una lista circular, donde los elementos de dicha lista estarán penalizados durante un cierto tiempo, es decir, durante un número establecido de iteraciones. Así pues, si un movimiento se encuentra en la lista no será aceptado, aunque de primeras parezca mejor que la solución actual. Basándonos en Riojas (2005) la lista tabú podrá almacenar:

- Soluciones visitadas recientemente
- Movimientos realizados recientemente
- Atributos o características que tenían las soluciones visitadas

Por otro lado, la dimensión de la lista (tabú tenure) es el número de iteraciones que un elemento permanece en dicha lista tabú. Aunque, el periodo tabú puede ser diferente para cada elemento que entra en la lista. De este modo, si todos poseen la misma tenure, estará identificada por la longitud de la lista tabú y seguirá una estructura FIFO. En cambio, si es variable puede darse el caso que un elemento que entra después que otro salga de la lista antes.

Tal como explica Melian y Glover (2014), la cuestión clave de la memoria basada en lo reciente es decidir un valor óptimo del periodo tabú. En demostraciones empíricas se ha demostrado que un buen valor del periodo tabú depende del tamaño del problema que se aborda. Aun así no se ha llegado a determinar ninguna regla estándar que termine el periodo efectivo para todas las clases de problemas. De todas formas, determinar este parámetro es tarea sencilla mediante la experimentación y el calibrado del problema, por ejemplo, se reconoce que es pequeño si aparecen valores repetitivos de la función objetivo. En cambio, es demasiado grande cuando se detecta un deterioro en la calidad de las soluciones encontradas.

### 4.2.2.3 El criterio de aspiración

Según Melian & Glover (2014), otro de los elementos que permite alcanzar los mejores niveles de ejecución de la búsqueda son los criterios de aspiración. Por consiguiente, se introduce como medio para determinar en qué

condiciones se puede reemplazar las restricciones tabúes, de forma que si se aplica este criterio el elemento tabú podría ser seleccionado en dicha iteración.

En primer lugar, se distingue entre aspiraciones de movimiento y aspiraciones de atributo. Las de movimiento se aplica cuando se invalida la clasificación tabú de un movimiento. Sin embargo, las segundas anulan el estado tabú del atributo. En este último caso el movimiento puede o no cambiar su condición de tabú, dependiendo de sí la restricción tabú puede activarse por más de un atributo

Aunque en la mayoría de las aplicaciones encontradas en la literatura emplean un tipo simple de criterio de aspiración, basada en eliminar la prohibición tabú de un movimiento cuando este da lugar a la mejor solución encontrada hasta el momento. Sin embargo, existen diversos criterios efectivos para mejorar la búsqueda. A continuación se muestra los criterios de aspiración recogidos en el artículo de Riojas (2005):

- Aspiración de Default: Si todos los movimientos posibles son clasificados como tabú, entonces se selecciona el movimiento “menos tabú”, es decir, si el movimiento  $m_1$  está penalizado en la lista tabú durante 2 iteraciones más y  $m_2$  está penalizado durante 1,  $m_2$  es menos tabú que  $m_1$
- Aspiración por Objetivo: Una aspiración de movimiento se satisface, permitiendo que un movimiento  $x$  sea un candidato para seleccionarse si, por ejemplo,  $F(x) <$  mejor costo. (en un problema de minimización)
- Aspiración por Dirección de Búsqueda: Un atributo de aspiración para la solución “s” se satisface si la dirección en “s” proporciona un mejoramiento y el actual movimiento es un movimiento de mejora. Entonces “s” se considera un candidato

#### 4.2.2.4 Concepto de movimiento

Para comprender en su totalidad el método de búsqueda tabú es necesario profundizar en el concepto de movimiento, ya que en el reside la capacidad de encontrar el vecindario de soluciones  $N(x)$  a partir de una solución  $x$ .

Anteriormente se definió el problema de optimización combinatoria como:

$$\text{Minimize } c(x): x \in X \text{ in } R_n$$

Siendo  $X$  el conjunto de soluciones factibles. De este modo para resolver  $P$  se puede establecer una serie de movimientos a través de los cuales se llega de una solución a otra. Glover (1989) definió un movimiento  $s$  que consistía en un mapeo definido en un subconjunto  $X(s)$  de  $X$ .

$$s: X(s) \rightarrow X$$

Es conveniente que, para realizar una búsqueda completa, el tamaño del entorno  $N(x)$  no sea elevado ya que la exploración del vecindario afectará al tiempo computacional. Así pues, si se considera un entorno de tamaño grande es conveniente realizar una búsqueda de un subconjunto tomado aleatoriamente. Si el vecindario a evaluar para determinar el siguiente movimiento es de un tamaño considerable y evaluar cada uno de los vecinos es costoso en términos de tiempo de computación, se puede usar procedimientos aleatorios, como por ejemplo Monte Carlo, que muestrean el espacio de búsqueda. En resumidas cuentas, se debe determinar el número de muestras y el tamaño de estas con el fin de evitar un tiempo de procesamiento elevado en la revisión del vecindario.

#### 4.2.2.5 Uso de memoria

Como se ha comentado en apartados anteriores, el uso de la memoria es una de las características principales de la búsqueda tabú que ayuda a moverse por el espacio evitando caer en óptimos locales. Basándonos en Melian & Glover (2003), las estructuras de memoria funcionan tomando como referencia cuatro dimensiones principales:

- La propiedad de ser reciente
- La frecuencia
- La calidad
- La influencia

Las dos primeras se complementan la una a la otra para conseguir un equilibrio entre la etapa de intensificación y la de diversificación, las cuales se verán más adelante con mayor profundidad. En cuanto a la dimensión de

calidad se refiere a la habilidad para diferenciar cómo de buenas o malas son las soluciones visitadas a lo largo del proceso. Pudiendo así identificar elementos comunes a soluciones buenas o caminos que conducen a ellas, y por tanto penalizando aquellas que conducen a soluciones peores. Por consiguiente, la flexibilidad de las estructuras anteriores permite guiar la búsqueda en un entono multiobjetivo. Y, finalmente la influencia refleja el impacto de las decisiones tomadas durante la búsqueda. Esta dimensión mide el grado de cambio provocado en la estructura de la solución o factibilidad.

En cuanto a las estructuras de memoria empleadas, serían las siguientes:

- Explícita: se emplea este tipo de estructura cuando se almacena la solución completa. Por ejemplo, registrar las mejores soluciones exploradas durante la búsqueda, tal que así:

$$\{x_2, x_8, x_{10}\}$$

Donde cada  $x_i$  son soluciones élite seleccionadas a lo largo del algoritmo.

- De atributos: registra información acerca de los atributos o características que cambian al moverse de una solución a otra, con el propósito de orientar la búsqueda. Por ejemplo, en grafos los atributos podrían ser nodos o arcos que son aumentados, eliminados o sustituidos por medio de los movimientos llevados a cabo.

Cabe destacar que estas estructuras de memoria pueden ser empleadas simultáneamente. En definitiva, la memoria explícita sirve para registrar las mejores soluciones, en cambio la de atributos interesa como guía de la búsqueda.

Por otro lado, una cuestión significativa en este tipo de búsqueda es distinguir entre la memoria de corto plazo y la de largo plazo, donde se verá las características y funciones de cada una. Aunque cada una tenga maniobras diferentes, ambas son empleadas con el mismo fin que es el de modificar el vecindario  $N(x)$  de la solución actual  $x$ .

#### **Memoria basada en lo reciente (corto plazo)**

Acorde a Glover et al. (2008), la memoria basada en lo reciente es la estructura de memoria más común en las implementaciones de búsqueda tabú. Esta estructura mantiene un registro de los atributos de las soluciones que han cambiado en un pasado reciente. Así pues, los atributos seleccionados que se encuentran en las soluciones visitadas recientemente se etiquetan como tabú-activos, y aquellas soluciones que contienen dichos elementos tabú activos o combinaciones particulares de atributos, son las que se convierten en tabú. Por consiguiente, se impide que ciertas soluciones del pasado pertenezcan a  $N^*(x)$ , y otras soluciones que comparten esos atributos tabú-activos también se impida ser exploradas durante un cierto de tiempo o un número determinado de iteraciones. Hay que reparar en que mientras la clasificación tabú se refiere estrictamente a soluciones que están prohibidas, en virtud de sus atributos, los movimientos que conducen a esas soluciones también se denominan tabúes.

#### **Memoria basada en frecuencia (largo plazo)**

Siguiendo las pautas de Glover et al.(2008), este tipo de memoria basada en frecuencia proporciona un tipo de información que complementa la exploración basada en lo reciente, ampliando así la base para seleccionar los movimientos preferidos. Esta frecuencia a menudo se pondera o descompone en subclases. Además, la frecuencia puede ser integrada con lo reciente para dar lugar una estructura compuesta con el fin de crear penalizaciones e incentivos que modifiquen las evaluaciones de los movimientos.

Dichas frecuencias consisten típicamente en ratios, cuyos numeradores figuran conteos que pueden ser expresados según dos medidas:

- Medidas de transición: corresponde al número de iteraciones donde un atributo cambia (entra o sale) de las soluciones visitadas en una trayectoria particular.
- Medidas de residencia: este caso va relacionado con el número de iteraciones donde un atributo pertenece a soluciones visitadas en una trayectoria particular, o en cambio, el número de ocasiones en las cuales un atributo pertenece a soluciones de un subconjunto particular.

Por otro lado, los denominadores representan generalmente una de estas tres cuantías:

- Número total de ocurrencias de todos los eventos representados por los numeradores, como el número total de iteraciones asociadas
- La suma o promedio de los numeradores, expresada como una suma de valores absolutos
- El valor máximo del numerador, expresado en valor absoluto ya que algunos podrían ser negativos

Según la medida escogida, estos ratios podrían expresar frecuencias de transición, las cuales llevan a cabo un seguimiento de la frecuencia con la que cambian los atributos o, frecuencias de residencia que rastrean la frecuencia con la que los atributos son miembros de las soluciones generadas. Por otro lado, los umbrales basados únicamente en los numeradores pueden ser útiles para indicar cuándo son apropiadas las fases de mayor diversificación.

#### 4.2.2.6 Estrategias de búsqueda

El empleo de la memoria basada en la frecuencia y en lo reciente tiene como objetivo evitar que los procesos de búsqueda ciclen. Pero generalmente, sobre todo este tipo de memorias están diseñadas para dar mayor robustez o vigor a la búsqueda.

Tal como expone Glover et al.(2008), un elemento de gran importancia en la memoria adaptativa de la búsqueda es instaurar un equilibrio entre la intensificación de la búsqueda y la diversificación de esta. En primer lugar, la base de las estrategias de intensificación es la modificación de las reglas de elección para alentarlas combinaciones de movimientos y características de atributos que en el pasado han dado buenas evaluaciones de la función objetivo. Además, también sirven para iniciar un retorno a regiones atractivas para explorarlas más a fondo. En cuanto a las estrategias de diversificación, al contrario que la primera, busca incorporar nuevas combinaciones y atributos que no han sido incluidos en las soluciones generadas en el pasado. Por consiguiente, su objetivo es impulsar la búsqueda en regiones diferentes a las que se examinaron. Cabe señalar que ambas estrategias no son opuestas, sino que mutuamente refuerzan la búsqueda llevada a cabo.

##### Intensificación

La mayoría de estas estrategias necesitan de un medio para identificar un conjunto de soluciones élite con el fin de incorporar buenos atributos en las soluciones recién creadas. La determinación de si una solución es superior al resto viene establecido por un umbral, el cual guarda relación con el valor de la función objetivo de la mejor solución encontrada durante la búsqueda.

Según Glover et al. (2008), existen dos sencillas variantes para la selección de dichas soluciones élite que han resultado tener bastante éxito. Una de estas, es la de introducir una medida de diversificación para asegurar que las soluciones registradas difieren entre sí en un grado deseado, y entonces eliminar toda la memoria a corto plazo hasta el momento antes de reanudar la búsqueda a partir de la mejor solución. La otra variante consistiría en mantener una lista secuencial de longitud limitada en la que se añade una nueva solución sólo si es mejor que las anteriores, y su memoria a corto plazo que acompaña a dicha solución se guarda también.

##### Diversificación

Siguiendo de nuevo las pautas de Glover et al.(2008), se podría decir que la diversificación aparece automáticamente en TS, hasta cierto punto, a través de funciones de memoria a corto plazo. No obstante, es cierto que se ve reforzada con la aplicación de ciertas medidas de memoria a largo plazo. Las estrategias de diversificación en la búsqueda tabú están basadas asiduamente en la modificación de las reglas de elección para introducir atributos en aquellas soluciones que se seleccionan o son visitadas con poca frecuencia. Como alternativa, se puede introducir tales atributos aplicando periódicamente métodos que reúnan subconjuntos de estos atributos en soluciones candidatas para continuar la búsqueda, o reiniciando parcial o totalmente el proceso de solución.

Las estrategias de diversificación son particularmente útiles cuando sólo se pueden alcanzar mejores soluciones cruzando barreras o “jorobas” en la topología del espacio de solución. Así pues, la aplicación de nuevos métodos modificados de elección puede presentarse como la siguiente función de penalización:

$$\text{Valor del movimiento}' = \text{valor del movimiento} + d * \text{penalización}$$

Este tipo de enfoque de penalización es muy común en la búsqueda tabú, siendo el valor de la penalización a menudo una función de medidas de frecuencia y  $d$ , un parámetro de diversificación calibrable que cuanto mayor sea, mayor será la diversificación aplicada.

### 4.2.3 Metodología de la Búsqueda Tabú

Como se ha recordado iteradamente a lo largo de este capítulo, en la búsqueda tabú dada una solución  $x$  se define su vecindario  $N(x)$  y se procede a evaluar las soluciones de dicho entorno para moverse a una mejor solución. Cabe señalar, que en este tipo de búsqueda el entorno se ve reducido al excluir aquellas soluciones tabúes.

Antes de mostrar el algoritmo y tal como recalca Riojas (2005) en su estudio, al confeccionar la Lista Tabú se debe considerar:

- Si las soluciones se almacenan completas o, por el contrario, ciertos atributos de estas
- El tamaño de dicha lista, conocido como tabú tenure
- Si se hará uso de la memoria de atributos
- Establecer un criterio de aspiración con el fin de poder llevar a cabo un “olvido estratégico” a través del cual un movimiento tabú pueda ser aceptado

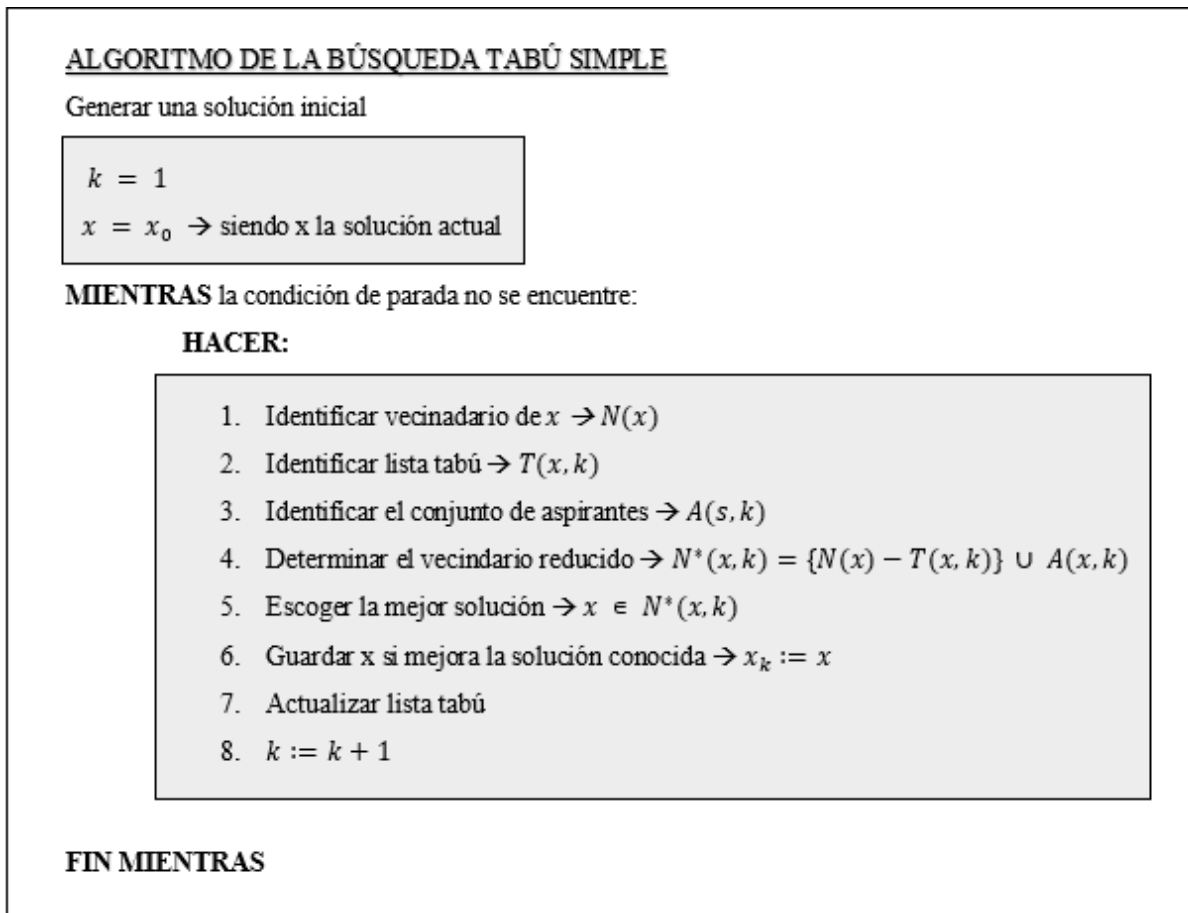


Figura 13: Algoritmo de la búsqueda tabú simple

## 4.3 Recocido simulado

Kirpatrick et al. (1983) propusieron este procedimiento, conocido en inglés como Simulated Annealing (SA), a través del cual se obtiene soluciones aproximadas a problemas de optimización. Tal como expone Martí (2003), el algoritmo de Metrópolis (Metropolis et al., 1953) constituye el fundamento del recocido simulado, el cual simula el cambio de energía en el proceso de enfriamiento de un sistema físico. Las leyes de la termodinámica establecen que, a una temperatura  $t$ , la probabilidad de un aumento de energía de magnitud  $\partial E$  viene dada por la expresión siguiente:

$$P(\partial E) = e^{-\frac{\partial E}{k \cdot t}}, \text{ donde } k \text{ es el coeficiente de Boltzmann.}$$

Así pues, el recocido simulado se basa en una analogía del comportamiento de un sistema físico al someterlo a



un baño de agua caliente, cuya implementación ha sido exitosa en numerosos problemas de optimización por su destreza para no quedar atrapado en óptimos locales. Además, su sencillez a la hora de implementarlo, así como los buenos resultados que iban surgiendo, el experimento tuvo un gran auge en la década de los 80.

En definitiva, acorde con Kirkpatrick et al. (1983), el proceso de recocido simulado consiste primero en “fundir” el sistema que se está optimizando a una temperatura efectiva elevada y seguidamente, reducir tal temperatura por etapas lentas hasta que el sistema se “congele” y no se produzcan más cambios. Así pues, en cada temperatura, la simulación debe proceder el tiempo suficiente para que el sistema alcance un estado estable. La secuencia de temperaturas y el número de reordenamientos de  $\{x_j\}$  intentos de alcanzar el equilibrio en cada temperatura puede considerarse un programa de recocido.

De este modo, dicho algoritmo es un procedimiento fundamentado en la búsqueda local, donde cualquier movimiento de mejora es aceptado y aquellos movimientos que no supongan una mejora, se permitirá acorde con unas probabilidades. Tales probabilidades se basarán en la analogía con el proceso físico de enfriamiento y se obtienen como función de la temperatura del sistema (Martí, 2003). Otro aspecto a tener en cuenta es la disminución de las probabilidades a medida que avanza el procedimiento y se acerca a la solución óptima. Por consiguiente, inicialmente se lleva a cabo una diversificación de la búsqueda sin tener un control exhaustivo del coste de las soluciones visitadas. En cambio, en iteraciones posteriores cada vez resultada más complicado el aceptar malos movimientos y consecuentemente, tiene lugar un descenso en el coste.

Entre las ventajas recogidas en Dréo et al. (2006):

- Se contempla que la técnica de recocido simulado generalmente alcanza una solución de buena calidad, es decir, un mínimo absoluto o mínimo relativo bueno para la función objetivo
- Se trata de un método general, aplicable y de fácil implementación para todos aquellos problemas que potencialmente pueden emplear las técnicas de optimización iterativas. Bajo la condición que después de cada iteración, el cambio sufrido en la función objetivo sea capaz de evaluarse de manera directa y rápida. Ya que el tiempo computacional puede volverse excesivo si no se puede evitar recalcular completamente la función objetivo después de cada iteración.
- Ofrece una gran flexibilidad, uno puede añadir nuevas restricciones después en el programa.

Por otro lado, este tipo de metaheurística traen consigo ciertas desventajas:

- Los usuarios a veces rechazan estas técnicas si involucran gran número de parámetros (temperatura inicial, tasa de disminución de la temperatura, duración de las etapas de temperatura, criterio de finalización del programa...). Aunque en muchas ocasiones los valores estándar publicados de dichos parámetros se ajustan y permiten un funcionamiento eficaz del método, la naturaleza empírica esencial de los mismo nunca puede garantizar su idoneidad para una gran variedad de problemas.
- Otro defecto, que viene relacionado con el anterior, es el tiempo computacional involucrado que es excesivo en ciertas aplicaciones. Para reducir este tiempo de cálculo, todavía se requiere un esfuerzo de investigación extenso para determinar los mejores valores de los parámetros.

### 4.3.1 Analogía

Tal como recoge Restrepo et al. (2004), a principios de los 80 cuando Kirkpatrick estudiaba el diseño de circuitos eléctricos y Cerny estudiaba el problema del agente viajero, encontraron de manera independiente que los problemas que trataban podían ser abordados con el algoritmo de Metrópolis dada su naturaleza combinatoria. Para ello, ambos pensaron en establecer una analogía entre los parámetros que participan en la simulación termodinámica, y los que intervienen en los métodos de optimización local. A continuación, se muestra en la Tabla 20 dicha analogía:

Tabla 20: Analogía entre la termodinámica y optimización

TERMODINÁMICA	OPTIMIZACIÓN
Configuración	Solución factible
Configuración fundamental	Solución óptima
Energía de la configuración	Costo de la solución
Temperatura	Parámetro de control

Como se puede observar, al concepto físico de temperatura no le corresponde un significado real en el campo de la optimización, así que deberá ser tratado como un parámetro que habrá que ir calibrando. Por lo tanto, viendo la analogía se podría vislumbrar la similitud entre los procesos en los que las moléculas de una sustancia van colocándose en los diferentes niveles energético buscando el equilibrio a una temperatura específica, con los procesos de minimización en optimización local.

### 4.3.2 Algoritmo básico

Este algoritmo es un método de búsqueda por entornos caracterizado por un criterio de aceptación de soluciones vecinas que se adapta a lo largo de su ejecución. Para ello emplea el parámetro de control que corresponde con la Temperatura  $T$ , del cual depende en qué medida pueden ser aceptadas las soluciones vecinas peores que la actual que se esté analizando en este momento. Así pues, antes de comenzar con el algoritmo es necesario fijar los siguientes parámetros:

- Temperatura inicial  $T_0$
- La velocidad de enfriamiento  $\alpha$
- La longitud  $L$ , se toma normalmente proporcional al tamaño esperado de  $N(x)$ . Para cada  $T$  se calcula el número  $L(T)$  de veces, antes de disminuir la temperatura, una solución que esté en el entorno  $N(x)$
- Temperatura final  $T_f$

De este modo, se fija la temperatura inicial  $T_0$ , que va disminuyendo en cada iteración a través de un mecanismo de enfriamiento,  $\alpha$ , hasta conseguir una temperatura final  $T_f$ .

Una vez que comience el algoritmo a iterar, habrá que tener en cuenta que en cada iteración se establece un número concreto de vecinos a analizar,  $L(T)$ , que en este caso puede ser fijo a lo largo del algoritmo o, por el contrario, variar según la iteración  $n$  o la temperatura  $T$  en la que se encuentre. En cuanto al criterio de aceptación de una nueva solución, cabe destacar que, si la solución candidata mejora el valor de la función objetivo analizada, se acepta automáticamente. Sin embargo, en el caso de empeorar la solución actual su aceptación dependerá de una probabilidad

$$\exp \frac{f(x_{actual}) - f(x_{candidata})}{T}$$

Para el cálculo de esta probabilidad se genera un número aleatorio uniforme, el cual si es menor que tal probabilidad será aceptada la solución del vecindario que se estudia. En cuanto a la probabilidad que se emplea, cabe señalar que, a mayor temperatura, mayor probabilidad de aceptación de soluciones peores. Por eso, a medida que se avanza en la exploración y la temperatura decremente, aquellas soluciones que con mayor coste tendrá menos posibilidades de formar parte de la solución del vecindario estudiado. Por otro lado, a menor diferencia de costes entre ambas soluciones, es decir  $f(x_{actual}) - f(x_{candidata})$ , mayor probabilidad de aceptación.

Finalmente, una vez que se acabe las  $L(T)$  iteraciones asociada a la temperatura  $T$  se procede al enfriamiento de dicha temperatura.

La clave de la implementación de SA, basándonos en Martí (2003), “es el manejo de la cola o secuencia de enfriamiento: cual es la temperatura inicial y cómo disminuye la temperatura en cada iteración, conforman las dos cuestiones a resolver en este algoritmo”. Pudiendo encontrar así, numerosos estudios donde se comparan

colas lentas donde la temperatura disminuye poco a poco con colas rápidas relacionadas con métodos de descenso simple con pequeñas perturbaciones.

A lo largo de este documento, se profundizará en este método a través de la adaptación del algoritmo del recocido simulado al problema planteado en este estudio. A continuación, la Figura 14 muestra la metodología del Recocido Simulado.

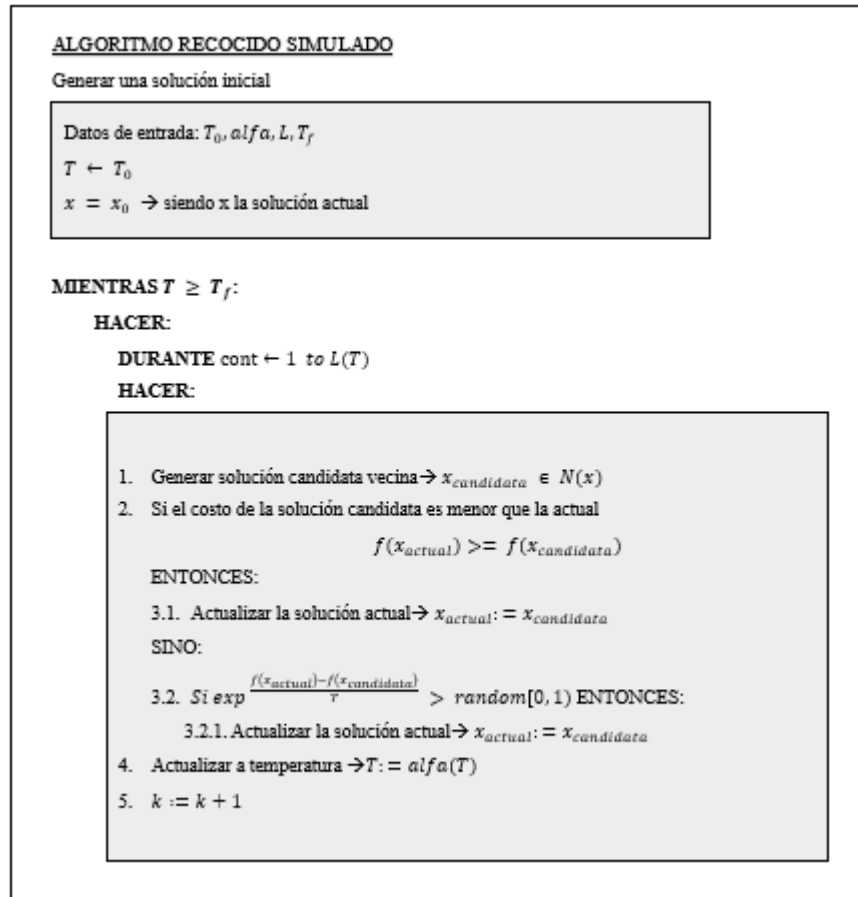


Figura 14: Algoritmo Recocido Simulado

## 4.4 Adaptación de los métodos al problema

En este apartado se va a contemplar cómo se ha adaptado tanto el método de la Búsqueda Tabú como el de Recocido Simulado al problema de acarreo terrestre con varios tamaños de contenedores.

### 4.4.1 Adaptación de la Búsqueda Tabú

#### 4.4.1.1 Parámetros

Para la resolución del problema planteado, se llevará a cabo el algoritmo de búsqueda tabú y para ello se contarán con los siguientes parámetros que posteriormente serán calibrados para un uso eficiente de dicho algoritmo:

- long<sub>tabu</sub>***: corresponde con la longitud de la lista tabú que se va a tomar
- n<sub>iter</sub>***: número de iteraciones donde se repite el algoritmo
- N<sub>filas</sub>***: número de filas de la tabla de permutaciones, donde aparece las posibles nuevas soluciones vecinas a escoger

- **Tamaño<sub>vec</sub>**: tamaño del vecindario reducido. Número de soluciones vecinas que serán evaluadas en cada iteración
- **penal<sub>flota</sub>**: factor de penalización del valor de la función objetivo si se elige una solución que traiga consigo el aumento de la flota de camiones.
- **penal<sub>frec</sub>**: factor de penalización por frecuencia. Este parámetro se aplica cuando se encuentra el algoritmo en la etapa de diversificación, es decir, cuando se tiene en cuenta la memoria basada en la frecuencia con la que ha sido seleccionada una solución. Este factor será primordial en la búsqueda a largo plazo, para no caer en soluciones ya escogidas con anterioridad y evitar el ciclado.
- **umbral<sub>frec</sub>**: El umbral de frecuencia viene ligado con la aparición de la etapa de diversificación en el programa. Por consiguiente, si aparece un cierto número de veces un conjunto de movimientos específicos (en las soluciones escogidas tras cada iteración) al detallado por el umbral o superior, se empieza a aplicar las penalizaciones por frecuencia y comienza así la búsqueda tabú con memoria a largo plazo

#### 4.4.1.2 Generación del vecindario

Para generar el vecindario  $N(x)$  en cada iteración a lo largo de la exploración de algoritmo, se ha empleado desde la permutación entre órdenes de la solución  $x$  de dicha iteración hasta la reubicación de órdenes dentro de un mismo camión o incluso en camiones diferentes. De este modo, en este apartado se va a detallar los tipos de permutaciones que se han llevado a cabo para crear soluciones vecinas. Cabe destacar que a la hora de implementar la búsqueda tabú a un problema de grandes dimensiones, no se ha podido evaluar todas las permutaciones posibles en cada iteración ya que el tiempo computacional aumentaba de manera considerable, así pues aleatoriamente se decidía si analizar una permutación u otra.

Otra a aspecto a comentar es el hecho de que el programa empleado no acepta soluciones no factibles a lo largo de la exploración, así pues, estas no pueden formar parte de  $N(x)$ . La factibilidad de la solución dependerá de dos aspectos:

- El límite del horizonte temporal de cada camión no podrá superar las 8 horas
- El límite de peso de la carga transportada por el camión no podrá superar las 26 toneladas

Por otro lado, si acepta soluciones factibles que incrementen el número de flota de la solución actual  $x$ , pero se penalizará el valor de la función objetivo ya que el aumento del número de camiones supone un incremento en los costes fijos. En definitiva, se intenta minimizar tanto el tiempo empleado en el cumplimiento de las órdenes asignadas como el tamaño de la flota.

Por tanto, se hará la siguiente clasificación que dependerá de si los intercambios son realizados entre órdenes de un mismo camión o en diferentes camiones; o si en vez de intercambiar posiciones entre dos elementos, se reubica alguna orden en huecos disponibles dentro del horizonte temporal en otros camiones. Se pueden dar varios casos de intercambio, que serán analizados tomando ejemplos para su mejor entendimiento. Para ello primero se expone en la Tabla 21 un ejemplo de una solución  $x$ , donde aparece los pedidos asignados a cada camión que se irán realizando en el orden asignado, los clientes de dichas órdenes y los pesos de los contenedores que serán transportados:

Tabla 21: Ejemplo de una solución  $x$  a lo largo de una exploración por búsqueda tabú


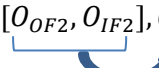
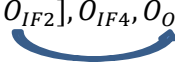
SOLUCIÓN ACTUAL $x$										
<b>ÓRDENES</b>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center; width: 33%;"><b>Camión 1</b></td> <td style="text-align: center; width: 33%;"><b>Camión 2</b></td> <td style="text-align: center; width: 33%;"><b>Camión 3</b></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">[[<math>O_{OF2}, O_{IF2}</math>], <math>O_{IF4}, O_{OF2}</math>]</td> <td style="text-align: center;">[<math>O_{IF2}, O_{IE2}, O_{OF4}</math>],</td> <td style="text-align: center;">[<math>O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}</math>]]</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">Órdenes de 20 pies acarreadas simultáneamente</td> </tr> </table>	<b>Camión 1</b>	<b>Camión 2</b>	<b>Camión 3</b>	[[ $O_{OF2}, O_{IF2}$ ], $O_{IF4}, O_{OF2}$ ]	[ $O_{IF2}, O_{IE2}, O_{OF4}$ ],	[ $O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}$ ]]	Órdenes de 20 pies acarreadas simultáneamente		
<b>Camión 1</b>	<b>Camión 2</b>	<b>Camión 3</b>								
[[ $O_{OF2}, O_{IF2}$ ], $O_{IF4}, O_{OF2}$ ]	[ $O_{IF2}, O_{IE2}, O_{OF4}$ ],	[ $O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}$ ]]								
Órdenes de 20 pies acarreadas simultáneamente										
<b>CLIENTES</b>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center; width: 33%;"><b>Camión 1</b></td> <td style="text-align: center; width: 33%;"><b>Camión 2</b></td> <td style="text-align: center; width: 33%;"><b>Camión 3</b></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">[[1, 2], 1, 3]</td> <td style="text-align: center;">[4, 5, 2]</td> <td style="text-align: center;">[1, 1, 4]</td> </tr> </table>	<b>Camión 1</b>	<b>Camión 2</b>	<b>Camión 3</b>	[[1, 2], 1, 3]	[4, 5, 2]	[1, 1, 4]			
<b>Camión 1</b>	<b>Camión 2</b>	<b>Camión 3</b>								
[[1, 2], 1, 3]	[4, 5, 2]	[1, 1, 4]								
<b>PESOS (t)</b>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center; width: 33%;"><b>Camión 1</b></td> <td style="text-align: center; width: 33%;"><b>Camión 2</b></td> <td style="text-align: center; width: 33%;"><b>Camión 3</b></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">[[15, 11], 22, 15]</td> <td style="text-align: center;">[20, 17, 26]</td> <td style="text-align: center;">[24, 18, 25]</td> </tr> </table>	<b>Camión 1</b>	<b>Camión 2</b>	<b>Camión 3</b>	[[15, 11], 22, 15]	[20, 17, 26]	[24, 18, 25]			
<b>Camión 1</b>	<b>Camión 2</b>	<b>Camión 3</b>								
[[15, 11], 22, 15]	[20, 17, 26]	[24, 18, 25]								

### Intercambios en un mismo camión

Tal como se puede contemplar en la siguiente Tabla 22, los posibles intercambios dentro de un mismo camión pueden estar resumidos en estos tres casos. Por un lado, el primer caso representa las permutaciones entre dos órdenes independientemente de los pies que tengas sus contenedores. El segundo ejemplo, en cambio la permutación conlleva el intercambio entre un conjunto de órdenes de 20 pies acarreadas simultáneamente y cualquier otra orden que se lleve a cabo independientemente, es decir, sin compartir contenedor durante su ejecución. Finalmente, el último caso trata las permutaciones únicamente entre órdenes de 20 pies, para poder así ver otras posibilidades de acarreos simultáneos entre contenedores de dicho tamaño.

En los tres casos se cumple la misma premisa, se crea una solución nueva a partir de las permutaciones entre elementos dentro de un mismo camión  $i$ , en la que el resto de los camiones se mantienen inmutables en la solución vecina generada.

Tabla 22: Ejemplo de permutaciones posibles dentro de un mismo camión

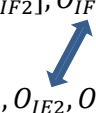


Permutación en el camión 1	Solución vecina
<p><b>Caso 1</b></p> <p>[[<math>O_{OF2}, O_{IF2}</math>], <math>O_{IF4}, O_{OF2}</math>]</p> 	<p>[[<math>O_{OF2}, O_{IF2}</math>], <math>O_{OF2}, O_{IF4}</math>], [<math>O_{IF2}, O_{IE2}, O_{OF4}</math>], [<math>O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}</math>]]</p> <p>CLIENTES <math>\rightarrow</math> [ [1, 2], 3, 1 ], [4, 5, 2], [1, 1, 4] ]</p> <p>PESOS <math>\rightarrow</math> [[13, 12], 13, 22], [20, 17, 26], [24, 18, 25]]</p>
<p><b>Caso 2</b></p> <p>[[<math>O_{OF2}, O_{IF2}</math>], <math>O_{IF4}, O_{OF2}</math>]</p> 	<p>[ [<math>O_{IF4}</math>], [<math>O_{OF2}, O_{IF2}</math>], <math>O_{OF2}</math> ], [<math>O_{IF2}, O_{IE2}, O_{OF4}</math>], [<math>O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}</math>]]</p> <p>CLIENTES <math>\rightarrow</math> [ [1, [1, 2], 3], [4, 5, 2], [1, 1, 4] ]</p> <p>PESOS <math>\rightarrow</math> [ [22, [13, 12], 13], [20, 17, 26], [24, 18, 25]] ]</p>
<p><b>Caso 3</b></p> <p>[[<math>O_{OF2}, O_{IF2}</math>], <math>O_{IF4}, O_{OF2}</math>]</p> 	<p>[[<math>O_{OF2}, O_{OF2}</math>], <math>O_{IF4}, O_{IF2}</math>], [<math>O_{IF2}, O_{IE2}, O_{OF4}</math>], [<math>O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}</math>]]</p> <p>CLIENTES <math>\rightarrow</math> [ [1, 3], 1, 2 ], [4, 5, 2], [1, 1, 4] ]</p> <p>PESOS <math>\rightarrow</math> [[13, 13], 22, 12], [20, 17, 26], [24, 18, 25]]</p>

### Intercambio entre pares de camiones

En esta ocasión, las permutaciones de órdenes entre camiones siguen la misma dinámica que en el apartado

anterior, la única diferencia es que entran en acción dos camiones cuyas órdenes asignadas cambiarán. El resto de la flota en cambio, en el ejemplo tomado el camión 3, se verá inalterada y sus órdenes seguirán siendo las mismas antes y después de la permutación. Cabe destacar que, en esta ocasión en el tercer caso del ejemplo analizado, la solución vecina sería no factible ya que el camión 1 con su nueva configuración no podría transportar simultáneamente las dos órdenes de 20 asignadas por exceder el peso límite  $[20, 12] = 32 t > 26 t$ . Por tanto, dicha solución vecina sería desechada.

Tabla 23: Ejemplos de permutaciones entre un par de camiones

Permutación entre el camión 1 y el 2	Solución vecina
<p><b>Caso 1</b></p> <p><math>[[O_{OF2}, O_{IF2}], O_{IF4}, O_{OF2}] \rightarrow cam 1</math></p>  <p><math>[O_{IF2}, O_{IE2}, O_{OF4}] \rightarrow cam 2</math></p>	<p><math>[[[O_{OF2}, O_{IF2}], O_{IE2}, O_{OF2}], [O_{IF2}, O_{IF4}, O_{OF4}], [O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}]]</math></p> <p>CLIENTES <math>\rightarrow [ [1, 2], 5, 3 ], [4, 1, 2], [1, 1, 4] ]</math></p> <p>PESOS <math>\rightarrow [ [13, 12], 22, 13 ], [20, 17, 26] , [24, 18, 25] ]</math></p>
<p><b>Caso 2</b></p> <p><math>[[O_{OF2}, O_{IF2}], O_{IF4}, O_{OF2}] \rightarrow cam 1</math></p>  <p><math>[O_{IF2}, O_{IE2}, O_{OF4}] \rightarrow cam 2</math></p>	<p><math>[[ O_{IF2}, O_{IF4}, O_{OF2} ], [[O_{OF2}, O_{IF2}], O_{IE2}, O_{OF4}], [O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}]]</math></p> <p>CLIENTES <math>\rightarrow [ [4, 1, 3] , [1, 2], 5, 2 ], [1, 1, 4] ]</math></p> <p>PESOS <math>\rightarrow [ [20, 22, 13] , [13, 12], 17, 26 ], [24, 18, 25] ]</math></p>
<p><b>Caso 3</b></p> <p><math>[[O_{OF2}, O_{IF2}], O_{IF4}, O_{OF2}] \rightarrow cam 1</math></p>  <p><math>[O_{IF2}, O_{IE2}, O_{OF4}] \rightarrow cam 2</math></p>	<p><math>[[[O_{IF2}, O_{OF2} ], O_{IF4}, O_{IF2}], [O_{OF2}, O_{IE2}, O_{OF4}], [O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}]]</math></p> <p>CLIENTES <math>\rightarrow [ [4, 2], 1, 3] , [1, 5, 2], [1, 1, 4] ]</math></p> <p>PESOS <math>\rightarrow [ [20, 12], 22, 13 ], [13, 17, 26] , [24, 18, 25] ]</math></p>

**Reubicación de órdenes en huecos libres**

En este apartado la permutación se realiza independientemente sean las órdenes del mismo camión o entre camiones diferentes. En primer lugar, resaltar que en este apartado no se realizan intercambios entre dos órdenes como tal, sino que se reubica una orden o conjunto de órdenes de 20 pies en huecos libres, es decir, en camiones a los cuales les queda holgura en su horizonte temporal y pueden seguir asignándoles otros pedidos.

En la siguiente tabla se analizan 4 ejemplos que resumen los posibles movimientos que están permitidos. En el primer caso se asigna una orden individual, que correspondía al camión 1, al camión 2. De esta forma se reubica la orden  $O_{OF2}$  al final de la cola de las órdenes del segundo camión. Del mismo modo se procede en el segundo caso, donde en vez de una orden individual trata un conjunto de órdenes de 20 pies cuyo transporte será simultaneo a lo largo de su acarreo. Por último, se encuentran los casos 3 y 4, los cuales juegan con la combinación entre órdenes de 20 pies. En el primero de estos, se crea una nueva combinación de 20 pies liberando tiempo al camión 1 mientras que en el último amplía dicha combinación, pasando la orden  $O_{OF2}$  de ser acarreada individualmente a combinar su contenedor con otro contenedor de 20 durante su trayecto.

Tabla 24: Ejemplos de reubicaciones de órdenes en huecos libres

Reubicación de órdenes en huecos libres	Solución vecina
<p><b>Caso 1</b></p> <p><math>[[O_{OF2}, O_{IF2}], O_{IF4}, O_{OF2}] \rightarrow \text{cam 1}</math></p> <p style="text-align: center;"><math>\updownarrow</math></p> <p><math>[O_{IF2}, O_{IE2}, O_{OF4}, \square] \rightarrow \text{cam 2}</math></p>	<p><math>[[[O_{OF2}, O_{IF2}], O_{IF4}], [O_{IF2}, O_{IE2}, O_{OF4}, O_{OF2}], [O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}]]</math></p> <p><i>CLIENTES</i> <math>\rightarrow [ [ [1, 2], 1 ], [4, 5, 2, 3], [1, 1, 4] ]</math></p> <p><i>PESOS</i> <math>\rightarrow [ [ [13, 12], 22 ], [20, 17, 26, 13], [24, 18, 25] ]</math></p>
<p><b>Caso 2</b></p> <p><math>[[O_{OF2}, O_{IF2}], O_{IF4}, O_{OF2}] \rightarrow \text{cam 1}</math></p> <p style="text-align: center;"><math>\swarrow</math></p> <p><math>[O_{IF2}, O_{IE2}, O_{OF4}, \square] \rightarrow \text{cam 2}</math></p>	<p><math>[[ O_{IF4}, O_{OF2} ], [O_{IF2}, O_{IE2}, O_{OF4}, [O_{OF2}, O_{IF2}]], [O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}]]</math></p> <p><i>CLIENTES</i> <math>\rightarrow [ [ 1, 3 ], [4, 5, 2, [1, 2]], [1, 1, 4] ]</math></p> <p><i>PESOS</i> <math>\rightarrow [ [ 22, 13 ], [20, 17, 26, [13, 12]], [24, 18, 25] ]</math></p>
<p><b>Caso 3</b></p> <p><math>[[O_{OF2}, O_{IF2}], O_{IF4}, O_{OF2}] \rightarrow \text{cam 1}</math></p> <p style="text-align: center;"><math>\updownarrow</math></p> <p><math>[[O_{IF2}, \square], O_{IE2}, O_{OF4}] \rightarrow \text{cam 2}</math></p>	<p><math>[[O_{OF2}, O_{IF4}, O_{OF2}], [[O_{IF2}, O_{IF2}], O_{IE2}, O_{OF4}], [O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}]]</math></p> <p><i>CLIENTES</i> <math>\rightarrow [ [ 1, 1, 3 ], [4, 1], 5, 2 ], [1, 1, 4] ]</math></p> <p><i>PESOS</i> <math>\rightarrow [ [13, 22, 13], [[20, 12], 17, 26], [24, 18, 25] ]</math></p>
<p><b>Caso 4</b></p> <p><math>[[O_{OF2}, O_{IF2}, \square], O_{IF4}, O_{OF2}]</math></p> <p style="text-align: center;"><math>\curvearrowright</math></p>	<p><math>[[[O_{OF2}, O_{IF2}, O_{OF2}], O_{IF4}], [O_{IF2}, O_{IE2}, O_{OF4}], [O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}]]</math></p> <p><i>CLIENTES</i> <math>\rightarrow [ [ [1, 2, 3], 1 ], [4, 5, 2], [1, 1, 4] ]</math></p> <p><i>PESOS</i> <math>\rightarrow [ [ [13, 12, 13], 22 ], [20, 17, 26], [24, 18, 25] ]</math></p>

#### 4.4.1.3 Selección del vecindario reducido

En cada iteración se creará una tabla de permutaciones, la cual almacenará aquellas permutaciones que correspondan con las soluciones vecinas con menor valor de la función objetivo, entre las cuales se elegirá una como solución de dicha iteración. La dimensión de esta tabla, es decir, el tamaño del vecindario reducido  $N^*(x)$  dependerá del parámetro  $N_{filas}$ .

Así pues, se hará uso de la memoria por atributos que simplificaría la búsqueda, en vez de almacenar las soluciones completas.

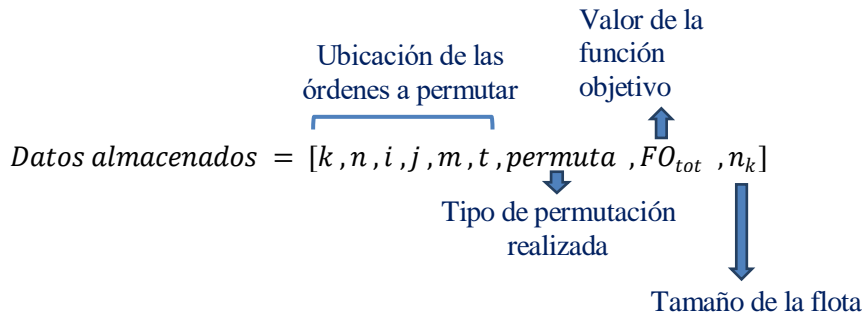


Figura 15: Estructura de memoria basada en atributos

De este modo, se guardará la ubicación de los elementos a permutar, almacenando los índices de las órdenes o huecos dónde se efectúa el intercambio. Siendo los índices  $k$  y  $n$  relativos al camión al que han asignados dichos pedidos. En cuanto al resto,  $i$  indica el orden de asignación del pedido a lo largo del horizonte temporal del camión  $k$ , lo mismo ocurre con el índice  $j$  pero en el camión  $n$ . Cabe señalar que cuando se realizan permutaciones en una misma unidad de transporte, los índices  $k$  y  $n$  coincidirían. Por último, se añade los índices  $m$  y  $t$ , para establecer la posición de estos dentro de un conjunto de órdenes de 20 pies cuyo acarreo sea compartido. En el caso que en la permutación aparezca una orden u órdenes transportadas independientemente, como en el ejemplo tomado, el valor de tales índices será 1. Así pues, en el ejemplo mostrado a continuación el índice  $t$  será  $t = 1$ .

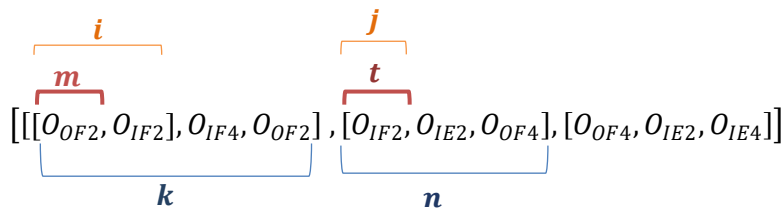


Figura 16: Índices de posición en una solución

En cuanto al resto de atributos, se añade la variable *permuta* la cual indica al programa que tipo de permutación se ha realizado según el valor que haya tomado como viene detallado en la Tabla 25. Los dos últimos atributos guardan el valor de la función objetivo que toma dicha solución vecina y el número de camiones que conforman la flota.

En definitiva, la elección de la solución vecina más apropiada dependerá en última instancia al valor de la función objetivo y a que los atributos de la solución final escogida no correspondan con ningún elemento de la lista tabú. Luego, los atributos relacionados con la permutación impuesta, es decir, índices y la variable de permutación, serán empleados para al final conformar la solución vecina completa de nuevo y guardarla para la próxima iteración, ya que en la tabla no se almacenan soluciones completas para disminuir la complejidad del almacenamiento de datos. Y, el número de camiones ayudará a penalizar el valor de la función objetivo en el caso que la solución vecina exceda el tamaño de la flota con respecto a la solución actual de dicha iteración.



Tabla 25: Tipo de permutaciones consideradas según la variable permuta

Variable <i>permuta</i>	Permutaciones
<p><i>permuta</i> = 1</p>	<p>Intercambio entre órdenes individuales, o conjunto de órdenes de 20 pies intercambiando posición con una orden individual u otro conjunto. Independientemente si la permutación se realiza en el mismo camión o entre un par.</p> <p><b>Ejemplos</b></p> <p><math>[[[O_{OF2}, O_{IF2}], O_{IF4}, O_{OF2}], [O_{IF2}, O_{IE2}, O_{OF4}], [O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}]]</math></p> <p><math>[[[O_{OF2}, O_{IF2}], O_{IF4}, O_{OF2}], [O_{IF2}, O_{IE2}, O_{OF4}], [O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}]]</math></p>
<p><i>permuta</i> = 2</p>	<p>Intercambio entre órdenes de 20 pies correspondientes a un conjuntos y órdenes de 20 individuales o pertenecientes a otros conjuntos. Independientemente si la permutación se realiza en el mismo camión o entre un par.</p> <p><b>Ejemplos</b></p> <p><math>[[[O_{OF2}, O_{IF2}], O_{IF4}, O_{OF2}], [O_{IF2}, O_{IE2}, O_{OF4}], [O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}]]</math></p> <p><math>[[[O_{OF2}, O_{IF2}], O_{IF4}, [O_{OF2}, O_{IE2}]], [O_{IF2}, O_{OF4}], [O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}]]</math></p>
<p><i>permuta</i> = 3</p>	<p>Reubicación de órdenes individuales, o conjunto de órdenes de 20 pies en huecos libres en el horizonte temporal de otro camión</p> <p><b>Ejemplos</b></p> <p><math>[[[O_{OF2}, O_{IF2}], O_{IF4}, O_{OF2}], [O_{IF2}, O_{IE2}, O_{OF4}, \_], [O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}]]</math></p> <p><math>[[[O_{OF2}, O_{IF2}], O_{IF4}, O_{OF2}], [O_{IF2}, O_{IE2}, O_{OF4}, \_], [O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}]]</math></p>
<p><i>permuta</i> = 4</p>	<p>Reubicación de órdenes de 20 pies dentro de un conjunto de órdenes de este tamaño cuyo acarreo es simultaneo y viceversa. Independientemente si el hueco libre se encuentra en el mismo camión o uno diferente.</p> <p><b>Ejemplos</b></p> <p><math>[[[O_{OF2}, O_{IF2}, \_], O_{IF4}, O_{OF2}], [O_{IF2}, O_{IE2}, O_{OF4}], [O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}]]</math></p> <p><math>[[[O_{OF2}, O_{IF2}], O_{IF4}, [O_{OF2}, O_{IE2}, \_]], [O_{IF2}, O_{OF4}], [O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}]]</math></p> <p><math>[[[O_{OF2}, O_{IF2}], O_{IF4}, O_{OF2}], [O_{IF2}, \_], O_{IE2}, O_{OF4}], [O_{OF4}, O_{IE2}, O_{IE4}]]</math></p>

#### 4.4.1.4 Uso de la memoria

Como se ha comentado en capítulos anteriores, una de las características principales de la búsqueda tabú es el empleo de la memoria para evitar que el problema cicle o quede atrapado en óptimos locales. En la programación de este algoritmo para la resolución del problema se ha tomado ambas estructuras de memoria, la explícita y de atributos. La primera almacena la mejor solución encontrada hasta el momento y la última recopila aquellos movimientos realizados en un pasado reciente que dan lugar a una nueva solución en cada iteración. Es decir, la memoria basada en atributos será empleada en la lista tabú generada a lo largo de la ejecución de programa.

En cuanto a las estrategias de búsqueda llevadas a cabo, primero se incorporó la memoria basada en lo reciente, en otras palabras, a corto plazo y al ver que a partir de ciertas iteraciones el programa ciclaba, se implementó la memoria basada en la frecuencia. Hay que recalcar que ambas estrategias no son opuestas, sino complementarias para una búsqueda más eficiente. A continuación, se comenta cómo se adaptó cada una de ellas:

##### Memoria basada en lo reciente

Es la más común en la implementación de la búsqueda tabú y esta se basa en la aplicación de la lista tabú. Su función es impedir que ciertas soluciones del pasado pertenezcan al vecindario generado y así evitando su exploración.

##### ➤ Lista tabú

En la lista tabú se guardarán ciertos atributos de la solución seleccionada en cada iteración durante un número de iteraciones dado, dependiendo de la dimensión de esta lista establecido por el parámetro  $long_{tabu}$ . Este parámetro impondrá el periodo de tiempo que los movimientos almacenados en la lista no podrán ser llevados a cabo, es decir, habrá ciertas permutaciones que en las siguientes exploraciones estarán prohibidas. Se ha decantado por este tipo de memoria con el fin de agilizar el programa y no aumentar el tiempo computacional, siendo la información guardada en la lista tabú la siguiente:

$$\text{Movimientos almacenados solución} = [k, n, i, j, m, t, \text{permuta}]$$

En el algoritmo implantado, la longitud de la lista tabú es constante y los elementos que componen tal lista siguen la metodología FIFO, mediante la cual el primero que entra será el primero que sale. Así pues, cuando se incorporan los atributos de una nueva solución, estos se colocarán a la cola de la lista e irán avanzando a medida que transcurran las iteraciones.

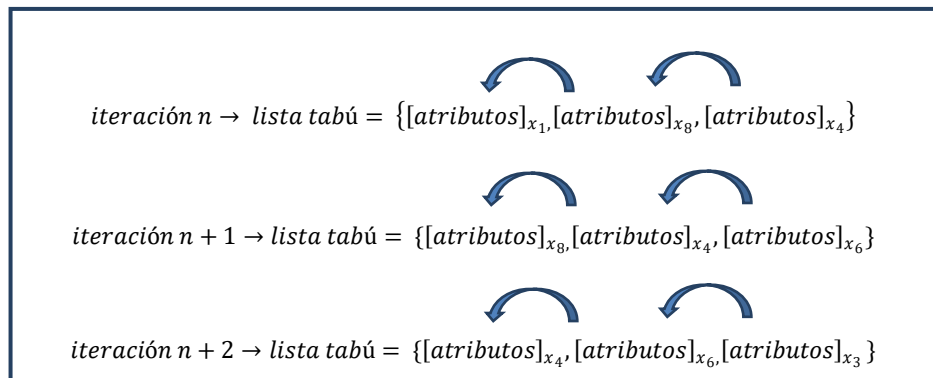


Figura 17 : Metodología de almacenamiento de atributos en la lista tabú

##### ➤ Criterio de aspiración

Cabe destacar, que también se incorporó un mecanismo para poder escoger del vecindario formado soluciones calificadas como tabú mediante el criterio de aspiración. Como ya se explicó anteriormente, existen diferentes modalidades de este criterio, en dicho trabajo se insertó el de aspiración por dirección de búsqueda. Este criterio acepta como válidas aquellas permutaciones que están prohibidas, ya que a través de ellas se alcanza la mejor solución conocida hasta el momento.

##### Memoria basada en frecuencia

Este tipo de memoria complementa la información basada en lo reciente y se integra para dar lugar a una

estructura que penaliza las evaluaciones de los movimientos de las soluciones exploradas que conforman el vecindario. De tal modo se tomó para medir la frecuencia, medidas de residencias, es decir, se realiza un conteo del número de ocasiones en la que ciertos atributos (en este caso los referentes a las permutaciones) son parte de la solución escogida tras cada iteración.

La búsqueda con memoria a largo plazo no se aplica desde el inicio, sino que dependerá del  $umbral_{frec}$  establecido. Parámetro cuyo valor se deberá calibrar, ya que de este depende el momento en el que la frecuencia penalizará la evaluación de la función objetivo de dichas soluciones mediante el factor de penalización  $penal_{frec}$ . De forma que el valor de la función objetivo se vería modificada así:

$$valor FO_{penal} = valor FO + penal_{frec} * frecuencia de residencia$$

Así pues, complementando la memoria a corto plazo y a largo plazo, se consigue integrar tanto las etapas de intensificación y diversificación para poder de este modo evitar el ciclado del problema y optimizar la búsqueda. La elección de la solución en cada iteración se verá limitada sólo por la lista tabú al comienzo y tras superar el umbral de frecuencia, se le sumará la penalización por la frecuencia. Por consiguiente, se seleccionará aquella solución cuyo valor de la función objetivo con la penalización impuesta si precede, sea el mejor dentro del vecindario explorado y cuyos atributos no se encuentren en la lista tabú. Esto último podrá ser permitido en el caso se pueda aplicar el criterio de aspiración, mediante el cual la prohibición no se aplicaría y significaría que se ha encontrado la mejor solución hasta el momento, la cual se guardaría mediante memoria explícita.

Por último, el número de iteraciones será otro parámetro por establecer y dependerá en gran medida del tamaño del problema. Este será calibrado para buscar un equilibrio, tanto para no exceder el tiempo computacional como para que del número de iteraciones suficientes para que se produzca una exploración capaz de encontrar la solución más próxima al óptimo exacto del problema.

#### 4.4.2 Adaptación del Recocido Simulado

En primer lugar, se muestra los parámetros empleados en la programación de dicho algoritmo. Cabe destacar que su implementación ha sido menos costosa ya que se han aprovechado muchos módulos creados para el algoritmo de la búsqueda tabú. Así pues, por ejemplo, los tipos de permutaciones llevadas a cabo son las mismas y la codificación de la solución tras cada iteración se mantiene con la misma estructura.

##### 4.4.2.1 Parámetros

La calibración de tales parámetros será de esencial importancia para la búsqueda, ya que su eficiencia dependerá de una buena evaluación de estos. Como consecuencia, la convergencia al óptimo del problema dependerá de una correcta parametrización. En el capítulo siguiente, se verá que valores fueron los más apropiados para la implantación de este método al problema de acarreo terrestre presentado.

##### Temperatura

Tal como se ha expuesto en otra ocasión, la temperatura es un parámetro de control, cuyo fin es controlar la variación de la probabilidad de aceptación de una solución peor ya que a menor valor de esta, menor la probabilidad de ser aceptada dicha solución. Por tanto, contará con  $t_0$ , que corresponde con la temperatura inicial con la que comienza la búsqueda y cuyo valor será fijado por la experiencia. El enfriamiento de este parámetro podría realizarse por diferentes métodos, en este caso se empleó el decremento exponencial,  $t_{k+1} = \alpha \cdot t_k$ , siendo  $\alpha$  un valor menor que 1.

Por tanto,  $\alpha$  es el parámetro que marca la velocidad de enfriamiento, siendo la velocidad de enfriamiento mayor cuanto menor sea  $\alpha$ .

##### Longitud de la cadena

La longitud de la cadena  $L$  para este algoritmo será constante a lo largo de las iteraciones ejecutadas. Así pues, en cada iteración se evalúa tantas soluciones vecinas como el valor impuesto por  $L$ . Por ende, permite realizar búsquedas más exhaustivas en cada una de las temperaturas asignadas.

##### Condición de parada

Para este método se tendrán dos condiciones de parada. En primer lugar, se establece una temperatura final  $t_f$ , que marca el último nivel de energía al que se puede llegar, una vez que ya se haya alcanzado dicha temperatura

el programa dejará de iterar, dando la mejor solución obtenida hasta el momento.

Por otro lado, también se imputará un número máximo de iteraciones  $Max_{iter}$ , asignando un tope y evitando un aumento excesivo del tiempo computacional.

#### 4.4.2.2 Solución inicial

El algoritmo del recocido simulado parte de una solución inicial, esta puede ser generada aleatoriamente o a través de otros métodos. En este caso, al igual que con la búsqueda tabú, se creó mediante el algoritmo del vecino más próximo, el cual ya se explicó en el apartado 3.4. Por consiguiente, ambos algoritmos en las partirán de la misma solución inicial en cada una de las versiones analizadas.

#### 4.4.2.3 Generación del vecindario y aceptación de la solución vecina

Para la generación del nuevo vecindario, ha jugado un gran papel la aleatoriedad. Cabe recordar que en la búsqueda tabú la solución vecina de cada iteración era aquella que obtenía un menor valor de la función objetivo y además que no fuese tabú dentro de un vecindario reducido. En cambio, en el recocido simulado la elección de la solución vecina era totalmente aleatoria, dónde el tipo de permutación impuesta estaría a manos del azar. Es importante destacar que la solución seleccionada deberá ser factible, de este modo el tiempo empleado no podrá exceder el horizonte temporal ni tampoco el límite de peso por camión. Por tanto, en el caso que aleatoriamente se escogiese un movimiento que diese una solución fallida se generaría una nueva solución hasta encontrar una que sea factible. Como se ha comentado al principio, las permutaciones que se han adoptado coinciden con las de la búsqueda tabú y están recogidas en la Tabla 25.

Una vez ya obtenida la solución factible, se compararía el valor de su función objetivo con la de la solución actual, si la solución vecina la mejorase, se aceptaría directamente o sino por el contrario, de nuevo, el azar y la función de probabilidad tomarían un papel importante a la hora de rechazar o no dicha solución vecina.

$$\exp \frac{f(x_{actual}) - f(x_{candidata})}{T} > \text{random}[0, 1)$$

Figura 18: Condición de aceptación de una solución vecina

# 5 RESULTADOS

## 5.1 Definición de la experimentación

El objetivo principal de este experimento es la aplicación tanto del método de la búsqueda tabú como el del recocido simulado al problema de acarreo terrestre con contenedores de 40 y 20 pies. El empleo de tales algoritmos tiene como finalidad la verificación y comparación de los resultados, pudiendo así estudiar qué posibilidades ofrece cada método de resolución y ver cuál de ellos da lugar una solución mejor.

Para ello se tomará como datos de entrada una cartera de 100 clientes, donde a su vez cada cliente encargará más de una orden. De este modo, en este problema en concreto se deberá asignar un total de 298 y los datos de entrada de dichas órdenes está plasmado en el Anexo de este proyecto. Por otro lado, cabe destacar que el tamaño de la flota no será fijado de antemano, ya que en este experimento no se contempla la demanda insatisfecha. Es decir, todas las órdenes deberán ser asignadas y entregadas.

A lo largo del experimento se abordará el problema desde diferentes perspectivas:

1. Acarreo de un contenedor por camión
2. Acarreo de contenedores de 40 y 20 pies, permitiendo el transporte simultáneo de dos contenedores de 20 pies
3. Acarreo de contenedores de 40 y 20 pies, permitiendo el transporte simultáneo de dos contenedores de 20 pies y limitado por un peso máximo de carga por camión

Además, como se ha comentado en capítulos anteriores, se contará tanto con limitaciones de peso, no se podrá exceder las 26 toneladas por camión, como límite en el horizonte temporal, el camión no podrá trabajar más de 8 horas diarias y límite de tamaño, no se podrá transportar contenedores de 20 y 40 pies a la vez.

## 5.2 Calibrado de los métodos

En este apartado se comentará cómo se llegó a fijar los parámetros tanto de la Búsqueda Tabú como los del Recocido Simulado. Para ello es importante tener claro, que efecto tienen cada uno de dichos parámetros en el problema e intentar conseguir un equilibrio de estos, donde no se incurra en un tiempo computacional excesivo y a la vez se encuentre una solución eficiente para el problema planteado. Para ambos métodos se tomó una cartera de 25 clientes que conforman en total 79 pedidos, un tamaño más reducido, Se seleccionó dicha cartera, en vez de la del problema a resolver en este trabajo, para agilizar el proceso de calibrado y evitar así un exceso de tiempo computacional motivado por la cartera de 100 clientes.

Se analizó cada una de las versiones, viendo también como las restricciones limitaban la exploración o beneficiaban a la reducción del tiempo empleado en llevar a cabo los pedidos asignados

### 5.2.1 Calibrado de la Búsqueda Tabú

En primer lugar, se incluye las conclusiones a las que se han llegado tomando diferentes escenarios y viendo cómo se comportaba el algoritmo según los parámetros tomados.

#### 5.2.1.1 Memoria a corto plazo frente la memoria a largo plazo

Por un lado, se comprobó la influencia de la memoria a largo plazo frente a la memoria a corto plazo. En este experimento se tomó una cartera de 5 clientes y un total de 17 pedidos, a diferencia del resto de calibrado que se empleó la cartera de 25 clientes ya mencionada al principio.

Resultó que en los casos donde sólo se incluía la etapa de intensificación, la búsqueda se centraba en un espacio concreto de exploración provocando así el ciclado del programa. Con la implementación de la búsqueda basada en la frecuencia, se intenta evitar soluciones ya escogidas implementando dos nuevos parámetros,  $umbral_{rec}$  y  $penal_{rec}$ . Cómo era de esperar ambas etapas eran complementarias y su combinación mejoraba la solución

e incluso el óptimo se encontraba en iteraciones más tempranas durante la ejecución del problema.

En definitiva, para la resolución del problema se llevará a cabo tanto la estrategia de memoria basado en lo reciente como aquella basada en la frecuencia. A continuación, se muestra varios escenarios dónde se hace palpable la mejoría en los resultados con la aplicación de la penalización por frecuencia. Se trata de experimentos realizados de la versión 2 del problema, dónde se toma dos escenarios y se compara la diferencia entre la aplicación únicamente de la memoria a corto plazo y, por otro lado, la combinación de esta con la memoria basado en lo frecuente. Como muestra la Tabla 26, las dos situaciones mejoran considerablemente la solución, reduciendo así el tiempo empleado por la flota.

Tabla 26: Parámetros asignados en la búsqueda tabú y valor de la función objetivo de cada escenario

Parámetros	Escenario 1	Escenario 2
$Long_{tabu}$	5	10
$N_{filas}$	10	10
$Penal_{flota}$	1,2	1,2
$N_{iter}$	100	100
$Umbral_{frec}$	5	5
$Penal_{frec}$	10	10

Tabla 27: Valor de la función objetivo en cada uno de los escenarios planteados

Valor FO (min)		
<i>Escenario 1</i>	CP	2074
	LP	1731
<i>Escenario 2</i>	CP	2074
	LP	1870

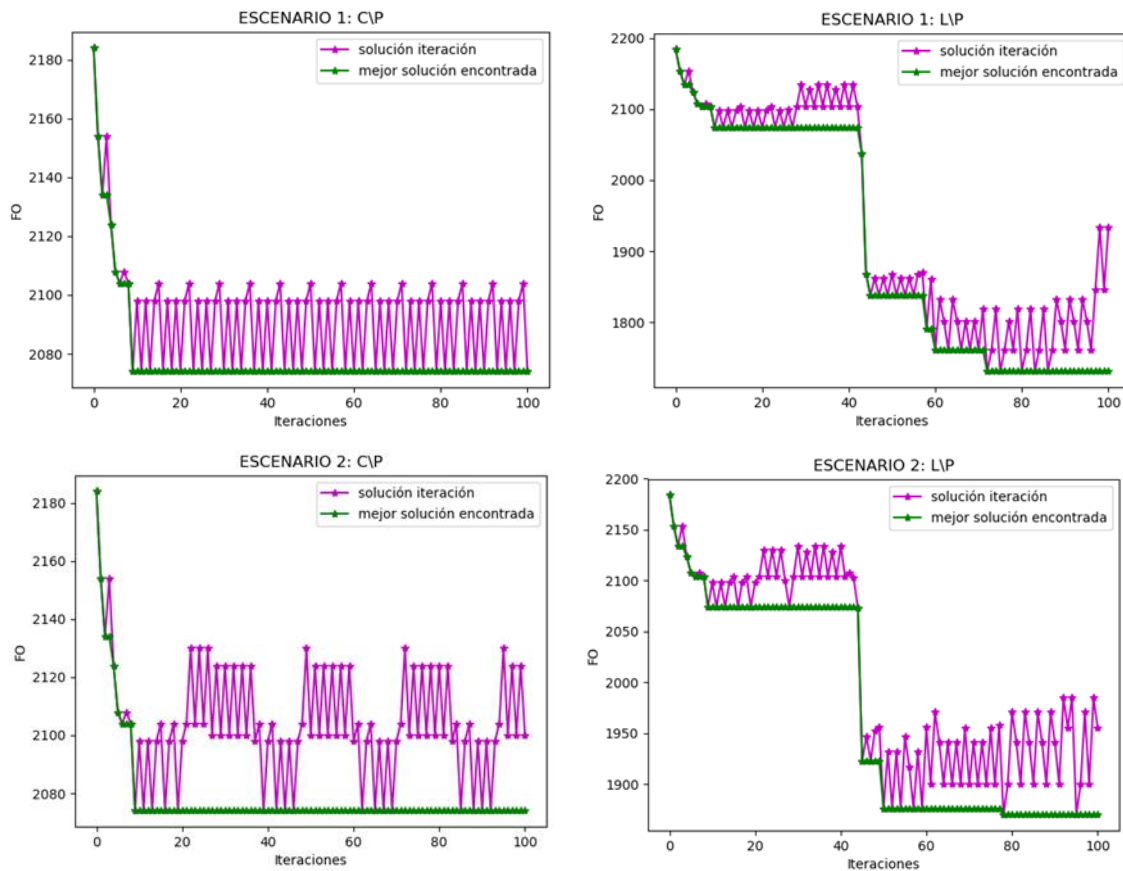


Figura 19: Comparativa entre estrategias de búsqueda basadas en lo reciente y en lo frecuente

### 5.2.1.2 Longitud tabú

Este parámetro está relacionado con el tiempo en el que permanecen las soluciones escogidas en la lista tabú, evitando a que sean escogidas a lo largo de cierto número de iteraciones (que coinciden con la dimensión de esta lista). Así pues se fijó constantes los parámetros de la Tabla 29 y se llevó a cabo la variación de la longitud de la lista tabú para ver cómo era el impacto de esta sobre el problema.

Como se puede observar en la siguiente Tabla 28, las versiones 2 y 3 no necesitan emplear una gran dimensión de esta lista. Esto último es favorable porque se libera una porción de memoria al programa, no deberá almacenar tantos atributos. En cambio los mejores resultados para la primera versión vienen acompañados de una dimensión de 8, aunque la diferencia entre 3 y 8 es pequeña pero esta última se necesitaría un camión menos en la flota.

Tabla 28: Calibrado de la longitud de la lista tabú  $long_{tabu}$ 

$long_{tabu}$	$V_1$		$V_2$		$V_3$	
	Valor F.O (min)	$N_k$	Valor F.O (min)	$N_k$	Valor F.O (min)	$N_k$
3	8468	25	5642	18	5340	15
5	8523	25	5646	18	5514	15
8	8410	24	5612	18	5604	16
12	8450	24	5632	18	5511	17

Tabla 29: Parámetros fijos durante el calibrado  $long_{tabu}$ 

Parámetros	
$n_{iter}$	100
$N_{filas}$	8
Tamaño $N(x)$	90
$penal_{frec}$	15
$umbral_{frec}$	8

### 5.2.1.3 Tamaño del vecindario

Durante cada iteración de la búsqueda tabú, se genera aleatoriamente un número determinado de soluciones vecinas, de las cuales se escogía tantas como la dimensión de la tabla de permutaciones permitía. Recordad que la tabla de permutaciones almacenaba los atributos de aquellas soluciones que alcanzaban tiempos de acarreo menores de cada vecindario generado y una vez seleccionado este conjunto, se escogía aquel movimiento que no fuese tabú y mostrase el mejor valor de la función objetivo. Por lo tanto es importante calibrar el tamaño del vecindario a evaluar, ya que un número elevado de soluciones vecinas podría contribuir a un aumento considerable del tiempo computacional y sin embargo, un tamaño demasiado reducido podría contribuir a que el método convergiera más lentamente.

En las tres versiones, no existe una gran variación en el valor de la función objetivo entre un vecindario compuesto por 120 soluciones y otro de 90. Así que se podría decir que para entorno de 90 soluciones vecinas se alcanzan buenos óptimos locales y se incurre menor tiempo computacional que con un tamaño de  $N(x) = 120$ . Sobre todo, la incidencia que tiene el tamaño del vecindario sobre el tiempo computacional se acrecienta a medida que el problema se vuelve más complejo, en este caso a medida que se aplica las limitaciones de tamaño y peso.



Tabla 30: Calibrado del tamaño del vecindario  $N^*(x)$

	$V_1$		$V_2$		$V_3$	
Tamaño $N(x)$	Valor F.O (min)	$N_k$	Valor F.O (min)	$N_k$	Valor F.O (min)	$N_k$
50	6735	16	5730	14	5585	16
90	6487	17	5205	13	5530	15
120	6480	17	5135	13	5542	16

Tabla 31: Parámetros fijados en el calibrado de  $N(x)$

Parámetros	$V_1$	$V_2$	$V_3$
$long_{tabu}$	8	3	3
$n_{iter}$	400	400	400
$penal_{frec}$	15	15	15
$umbral_{frec}$	8	8	8

#### 5.2.1.4 Penalización por frecuencia

En cuanto a este parámetro ligado a la memoria basado en lo frecuente, las tres versiones coincidían en una misma cuestión, a mayor penalización por frecuencia, mejor actuará la memoria a largo plazo, excluyendo aquellas soluciones que ya han salido en numerosas iteraciones y explorando así nuevos horizontes. Así pues, como se puede contemplar en la Tabla 34, los escenarios cuya solución muestra mejores tiempos y menor tamaño de flota coinciden con un factor de penalización de frecuencia de 20.

Tabla 32: Calibrado del factor de penalización de frecuencia  $penal_{frec}$

	$V_1$		$V_2$		$V_3$	
$penal_{frec}$	Valor F.O (min)	$N_k$	Valor F.O (min)	$N_k$	Valor F.O (min)	$N_k$
5	8468	25	5559	17	5640	17
10	8481	25	5555	17	5718	17
20	8395	24	5376	17	5662	16

Tabla 33: Parámetros fijados en el calibrado  $penal_{frec}$ 

Parámetros	$V_1$	$V_2$	$V_3$
$long_{tabu}$	8	3	3
$n_{iter}$	200	200	200
$N_{filas}$	8	8	8
$umbral_{frec}$	8	8	8

### 5.2.1.5 Umbral de frecuencia

Otro parámetro importante ligado a la frecuencia es el umbral de frecuencia, cuanto mayor sea este más tardía será la diversificación y efectivamente, mayor probabilidad que el programa cicle durante la etapa de memoria a corto plazo. De todas formas, este factor irá ligado al número de iteraciones que se lleven a cabo, es conveniente imponer un umbral bajo si el número de iteraciones es pequeño ya que así se asegura que entre en acción la etapa de diversificación. Sin embargo, con un número de iteraciones alto, se podría dar margen para aplicar la etapa de diversificación y dejar actuar de manera eficiente la fase dónde únicamente actúa la memoria basada en lo reciente. Además, mencionar que, a mayor tamaño del problema, más tardía aparecerá la etapa de diversificación ya que la probabilidad de repetir los mismos atributos a lo largo de las soluciones seleccionadas disminuye. Esto ocurre sobre todo en las variantes del problema 2 y 3, dónde hay mayor número de permutaciones posibles y esto provoca que la frecuencia con la que aparezcan los mismos atributos sea menor.

Durante el calibrado, los mejores tiempos coincidían tanto en la primera como la segunda versión con un umbral de frecuencia de 2. Sin embargo, la última versión la mejor flota y tiempo de acarreo total calculado se daba con un umbral de 4, es decir, una vez que sean seleccionados como solución un total de 4 veces unos atributos de memoria concretos se iniciará la etapa de diversificación.

Tabla 34: Calibrado del umbral de frecuencia  $umbral_{frec}$ 

$umbral_{frec}$	$V_1$		$V_2$		$V_3$	
	Valor F. O (min)	$N_k$	Valor F. O (min)	$N_k$	Valor F. O (min)	$N_k$
2	8405	25	5389	16	5703	16
4	8459	26	5592	18	5508	16
6	8484	25	5638	18	5589	17

Tabla 35: Parámetros fijados en la calibración de  $umbral_{frec}$

Parámetros	$V_1$	$V_2$	$V_3$
$long_{tabu}$	8	3	3
$n_{iter}$	200	200	200
$N_{filas}$	8	8	8
$penal_{frec}$	20	20	20

### 5.2.1.6 Número de iteraciones

El número de iteraciones que el programa ejecuta va ligado directamente con el coste computacional del algoritmo. Por tanto, hay que plantearse hasta qué punto es eficiente aumentar el número de iteraciones para realizar una búsqueda más profunda.

Los mejores resultados coinciden con el mayor número de iteraciones como era de esperar, pero hay versiones que muestran una mejora más palpable frente al resto. Por ejemplo, la versión 2 disminuye considerablemente tanto su flota como el tiempo empleado de acarreo, ahorrándose cerca de 500 minutos. No obstante, la diferencia de tiempos entre  $n_{iter} = 400$  y  $n_{iter} = 600$  es inapreciable en la primera versión o en la última. Esto último indicaría que el problema converge antes de las 600 iteraciones y no parece necesario seguir aumentando el número de iteraciones, ya que implicaría mayor tiempo de ejecución del programa sin acompañarlo de unos resultados que optimicen en gran medida la solución.

Solo queda señalar una última apreciación, se está calibrando un problema de tamaño menor al original y esto puede provocar que el problema que se estudiará de 100 clientes necesite en la práctica un mayor número de iteraciones para converger.

Tabla 36: Calibrado del número de iteraciones  $n_{iter}$

$n_{iter}$	$V_1$		$V_2$		$V_3$	
	Valor F. O (min)	$N_k$	Valor F. O (min)	$N_k$	Valor F. O (min)	$N_k$
<b>600</b>	<b>6400</b>	<b>17</b>	<b>5187</b>	<b>13</b>	<b>5359</b>	<b>13</b>
<b>400</b>	6422	17	5212	14	5358	13
<b>100</b>	6429	18	5391	15	5600	15
<b>50</b>	6569	18	5706	15	5791	17

Tabla 37: Parámetros fijados durante el calibrado de  $n_{iter}$ 

Parámetros	$V_1$	$V_2$	$V_3$
$long_{tabu}$	8	3	3
$N_{filas}$	8	8	8
$penal_{frec}$	20	20	20
$umbral_{frec}$	2	2	4

En definitiva, el valor de los parámetros resultantes fijados durante la calibración se resume en la siguiente tabla:

Tabla 38: Parámetros del TS resultantes del proceso de calibrado

Parámetros	$V_1$	$V_2$	$V_3$
$long_{tabu}$	8	3	3
$n_{iter}$	600	600	600
Tamaño $N(x)$	120	120	90
$N_{filas}$	8	8	8
$penal_{frec}$	20	20	20
$umbral_{frec}$	2	2	4

## 5.2.2 Calibrado del Recocido Simulado

En cada parámetro calibrado se ha llevado a cabo una diferenciación de las tres versiones, tomando cada una de ellas en ciertos casos parámetros diferentes, donde se hicieron múltiples pruebas para dotar de un valor eficiente a cada parámetro.

### 5.2.2.1 Temperatura inicial

La temperatura inicial es un parámetro de control clave para el algoritmo SA, se ha tomado un abanico amplio de temperaturas, donde se ha variado este desde 200 a 20.

Como viene representado en la Tabla 41 a continuación, las tres versiones muestran el mejor valor de la función objetivo con una temperatura inicial de 200, viéndose reducido así tanto el tiempo como la flota empleada. Pudiéndose ahorrar en las dos últimas versiones dos camiones en la flota empleando una temperatura más elevada. Por tanto, el empleo de  $T_0 = 200$  traen consigo una búsqueda ampliada e irremediablemente, dedicar más tiempo en la obtención de una solución óptima. El tiempo de ejecución no será idéntico en las tres versiones, ya que la primera versión no tiene un abanico tan amplio de permutaciones y la combinación de órdenes de 20 pies no tiene cabida durante su ejecución. Sin embargo, la segunda si deberá tener presente este tipo de combinaciones e incluso la última versión deberá solventar la limitación del peso, dando soluciones factibles que no excedan en el peso por camión. Todo esto trae consigo programas con códigos más elaborados para cumplir todas las restricciones presentadas.

Tabla 39: Calibrado de la temperatura inicial  $T_0$

$T_0$	$V_1$		$V_2$		$V_3$	
	Valor F.O (min)	$N_k$	Valor F.O (min)	$N_k$	Valor F.O (min)	$N_k$
200	8631	22	5643	14	5763	14
100	8799	23	5666	16	5829	14
50	8695	23	5821	15	5791	14
20	8755	23	5914	15	5841	16

Tabla 40: Parámetros fijados durante el calibrado  $T_0$

Parámetros	
$\alpha$	0.95
<b>L</b>	10
$T_f$	5
$Max_{iter}$	100

### 5.2.2.2 La velocidad de enfriamiento

Como se ha comentado en otras ocasiones, este parámetro marcará la disminución de temperatura a lo largo del método, a través de un decremento exponencial. Valores altos ralentizará el enfriamiento, sin embargo, valores pequeños tomarían un rango menor de temperaturas que explorar.

Contemplando la Tabla 30, se puede observar cómo se acrecienta la diferencia del valor de la función objetivo dentro del rango de  $\alpha$  dado. Tomando un valor de  $\alpha = 0.95$ , se llega a ahorrar, por ejemplo, 5 camiones de la flota en la versión 2 o hasta 800 minutos en la primera y última versión. Por lo tanto, las tres adaptaciones del problema coinciden en tomar cómo el más eficiente, un factor de velocidad de enfriamiento de 0.95, permitiendo un rango amplio de temperaturas que explorar, pero a su vez no tan exhaustivo como con  $\alpha = 0.95$ .

Tabla 41: Calibrado del coeficiente de velocidad de enfriamiento  $\alpha$ 

A	$V_1$		$V_2$		$V_3$	
	Valor F.O (min)	$N_k$	Valor F.O (min)	$N_k$	Valor F.O (min)	$N_k$
0.99	9508	24	6001	15	6676	16
0.95	8708	22	5218	12	5744	14
0.9	8756	22	5783	15	6113	14
0.8	8801	23	6122	16	6236	16

Tabla 42: Parámetros fijados durante el calibrado de  $\alpha$ 

Parámetros	$V_1$	$V_2$	$V_3$
$T_0$	200	200	200
L	10	10	10
$T_f$	5	5	5
$Max_{iter}$	100	100	100

### 5.2.2.3 Longitud de la cadena

La longitud de la cadena marcará el número de veces que se evalúa una solución vecina dentro de un mismo rango de temperatura. Por tanto, a mayor longitud de la cadena, más amplia será la búsqueda. En este caso las tres versiones coinciden en el mismo valor,  $L = 60$ , reduciendo así la flota empleada a costa de aumentar el coste computacional pero la diferencia de la solución dada por este parámetro respecto al valor de la función objetivo del resto es significativa en las tres versiones. Cabe destacar que en la versión 2 se llega a conseguir una flota de 13 camiones en vez de 17 que sería la hallada con  $L = 10$ . El resto de las versiones no tienen una diferencia de camiones tan considerable, pero si el tiempo empleado en el acarreo mejora sustancialmente como se puede observar en la Tabla 43.

Tabla 43: Calibrado de la longitud de la cadena L

L	$V_1$		$V_2$		$V_3$	
	Valor F.O (min)	$N_k$	Valor F.O (min)	$N_k$	Valor F.O (min)	$N_k$
60	8520	22	5360	13	5653	14
30	8750	23	5515	14	5698	14
20	8729	22	5666.	13	5835	16
10	8884	23	6087	17	6177	15

Tabla 44: Parámetros fijados durante el calibrado de L

Parámetros	$V_1$	$V_2$	$V_3$
$T_0$	20	200	200
$\alpha$	0.95	0.95	0.95
$T_f$	1,2	1,2	1,2
$Max_{iter}$	100	100	100

#### 5.2.2.4 Temperatura final

La temperatura final conforma uno de los mecanismos de parada del programa. Cuanto mayor sea esta, mayor rango de temperaturas será exploradas. Como se puede observar en la tabla 45, existen saltos considerables entre los valores de la función objetivo tanto en las 3 versiones. De ahí que con una temperatura  $t_f = 0.05$  se consiga la solución mejor, permitiendo a programa seguir iterando y buscando soluciones mejores. Este caso es muy representativo para mostrar el carácter convergente de este método.

Tabla 45: Calibrado de la temperatura final  $T_f$ 

$T_f$	$V_1$		$V_2$		$V_3$	
	Valor F. O (min)	$N_k$	Valor F. O (min)	$N_k$	Valor F. O (min)	$N_k$
50	9290	24	6301	15	6596	16
10	8768	23	5385	13	5839	15
1	8662	22	5293.	13	5662	14
0.05	8595	22	5210	13	5568	14

Tabla 46: Parámetros fijados durante el calibrado de  $T_f$ 

Parámetros	$V_1$	$V_2$	$V_3$
$T_0$	20	200	200
$\alpha$	0.95	0.95	0.95
L	60	60	60
$Max_{iter}$	100	100	100

### 5.2.2.5 Máxima iteración

Por último, lugar se analiza el segundo mecanismo de parada implantado, el número máximo de iteraciones del programa. Efectivamente a mayor número de iteraciones, el número de soluciones vecinas evaluadas será mayor y más probabilidad de encontrar un óptimo mejor, pero a su vez que el programa ejecute todas las iteraciones depende de si la temperatura final se ha alcanzado o no. Pero como todo lo relacionado con las metaheurísticas, hay que llegar a un equilibrio entre el tiempo computacional y la eficiencia de la solución. El ejemplo tomado para llevar a cabo el calibrado, constaba de 25 clientes y no suponía un exceso considerable de tiempo el implantar 200 iteraciones, pero con el problema original que se va a plantear a continuación con 100 clientes, puede que el número máximo de iteraciones se vea modificado si acarrea un elevado costo computacional.



Tabla 47: Calibrado de la máxima iteración  $Max_{iter}$

$T_f$	$V_1$		$V_2$		$V_3$	
	Valor F.O (min)	$N_k$	Valor F.O (min)	$N_k$	Valor F.O (min)	$N_k$
200	8605	21	5311	12	5713	13
100	8616.	23	5250	13	5794	14
50	8856.	24	6610	17	6219	16

Tabla 48: Parámetros fijados durante el calibrado de  $Max_{iter}$

Parámetros	$V_1$	$V_2$	$V_3$
$T_0$	200	200	200
$\alpha$	0.9	0.95	0.95
L	60	60	60
$t_f$	0.05	0.05	0.05

En resumidas cuentas, finalmente las tres versiones contarán con los mismos valores para los parámetros de SA, que serán los que se muestra a continuación en la Tabla 49:

Tabla 49: Parámetros del SA resultantes del proceso de calibrado

Parámetros	$V_1$	$V_2$	$V_3$
$T_0$	200	200	200
$\alpha$	0.95	0.95	0.95
L	60	60	60
$t_f$	0.05	0.05	0.05
$Max_{iter}$	600	600	600

### 5.3 Resultados de la búsqueda tabú

A continuación, se muestra los resultados obtenidos de cada una de las versiones planteadas para el experimento de una cartera de 100 clientes que conforman un total de 298 pedidos. Tal como se expone en la Tabla 50, se contempla que los mayores tiempos alcanzados de la función objetivo corresponden con la primera versión. Esto viene causado por la no posibilidad de combinar contenedores, es decir, se maneja de igual manera tanto las unidades de carga de 40 pies como la de 20. Por ejemplo, si se acarrea una orden de llegada  $O_{IF2}$ , al finalizar el camión acaba con un contenedor vacío de 20 pies y libre. Si seguidamente hay que hacer la misma orden para otro cliente, la primera versión no posibilita combinar ambos contenedores de 20 pies, por consiguiente debería dejar el contenedor vacío en el depósito y seguidamente ir a la terminal a recoger el segundo contenedor. Desde

el punto de la logística, es ineficiente cómo se tramita la planificación de las órdenes que se llevan a cabo frente al modo de trabajar de las dos versiones restantes. No obstante, evidentemente es la que posee un menor tiempo computacional ya que su limitación disminuye el área de exploración considerablemente.

En cuanto a la segunda versión, emplea un tiempo y una flota menor que la última alternativa estudiada, además de un tiempo computacional más reducido. La razón de esto es la restricción de peso presentada por la versión 3, limitando ciertos movimientos que incrementarían el valor de la función objetivo y el coste computacional. Aunque en definitiva, la tercera versión es la que aporta una solución más completa ya que tiene en cuenta los pesos de los contenedores, factor que se considera actualmente en el transporte de mercancías.

Tabla 50: Resultados alcanzados mediante la búsqueda tabú

Versión	Valor FO	$N_k$	Tiempo computacional
<b><math>V_1</math>: Cada camión solo puede llevar un contenedor</b>	433.55 h	76	506.61 s
<b><math>V_2</math>: Cada camión puede llevar varios contenedores, limitado solo por el tamaño de los mismos</b>	353.45 h	63	1684.46 s
<b><math>V_3</math>: Cada camión puede llevar varios contenedores, limitado por tamaño y peso</b>	374,23 h	64	6003.60 s

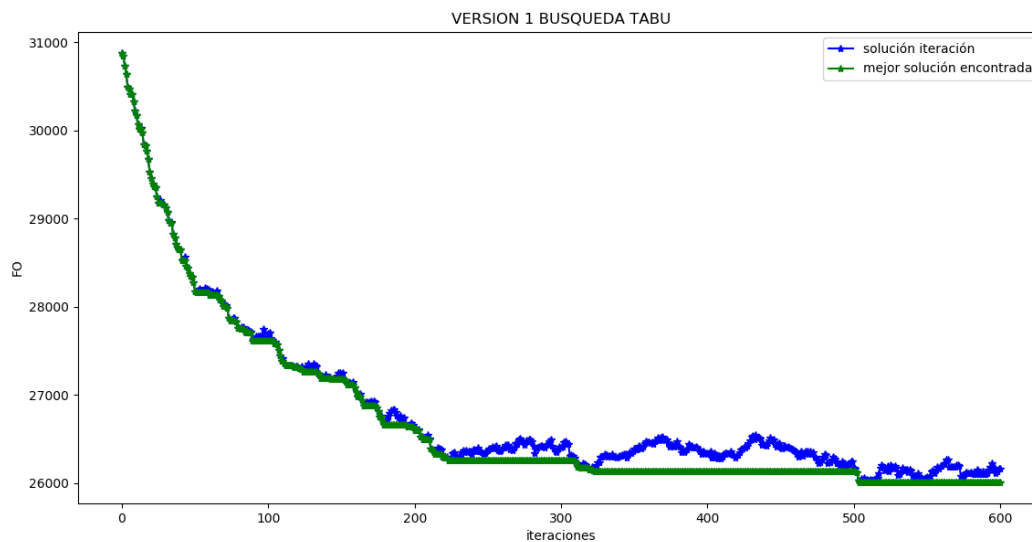


Figura 20: Soluciones obtenidas durante la búsqueda tabú en la versión 1 del problema

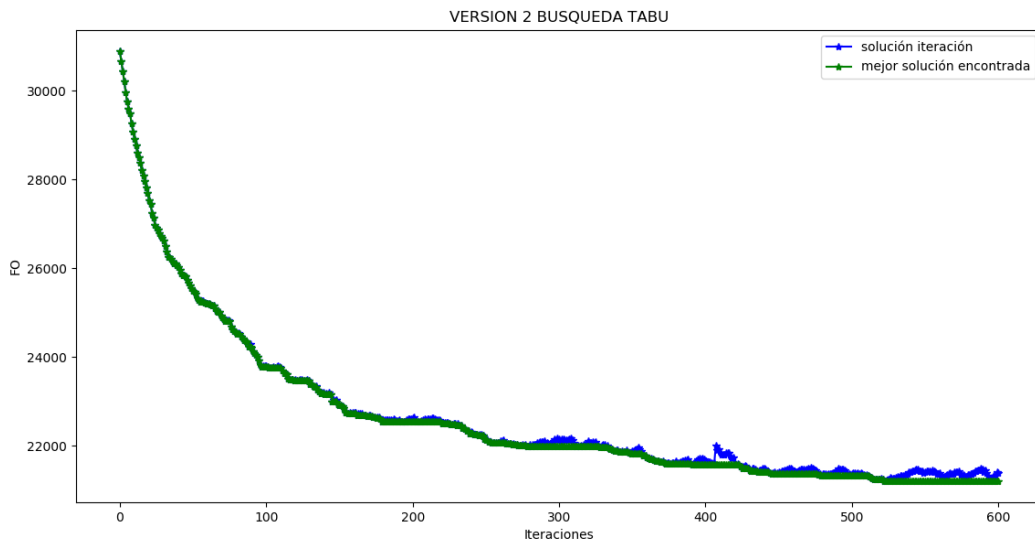


Figura 21: Soluciones obtenidas durante la búsqueda tabú en la versión 2 del problema

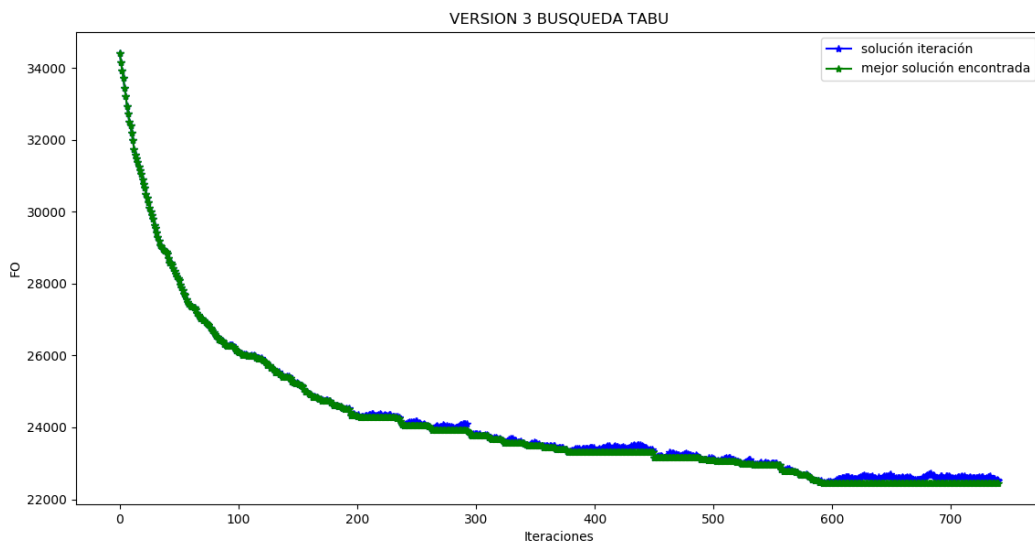


Figura 22: Soluciones obtenidas durante la búsqueda tabú en la versión 3 del problema

## 5.4 Resultados del recocido simulado

En este apartado, se analiza los resultados obtenidos mediante el algoritmo del recocido simulado. En la Tabla 51, se detalla el tiempo total de acarreo para cada una de las versiones, acompañado del tamaño de la flota y el tiempo computacional que se ha empleado para resolver el problema planteado. Del mismo modo que se ha podido contemplar en la búsqueda tabú, el mayor valor de la función objetivo corresponde al problema dónde sólo se puede transportar un contenedor por camión, pero a su vez el programa es el más veloz en cuanto a su tiempo de ejecución.

En cuanto a la segunda versión abordada, es mediante la cual se obtiene el mejor resultado, ahorrando unas 30 horas con respecto al tercer caso, empleado el menor número de camiones y además mostrando un tiempo

computacional mucho menor. Todo esto está motivado por no tener limitación de peso, ampliando así la zona de exploración. Por consiguiente, la última versión aumenta de forma significativa el coste computacional, aunque sus valores no se distancian tanto de la versión 2 y como se ha comentado en el apartado anterior, su solución podría ser de más utilidad en la actualidad.

Tabla 51: Resultados alcanzados mediante el método de recocido simulado

Versión	Valor FO	$N_k$	Tiempo computacional
<b><math>V_1</math>: Cada camión solo puede llevar un contenedor</b>	597,9 h	91	120.85 s
<b><math>V_2</math>: Cada camión puede llevar varios contenedores, limitado solo por el tamaño de los mismos</b>	361,5 h	59	451.73 s
<b><math>V_3</math>: Cada camión puede llevar varios contenedores, limitado por tamaño y peso</b>	391,82 h	65	2956.63 s

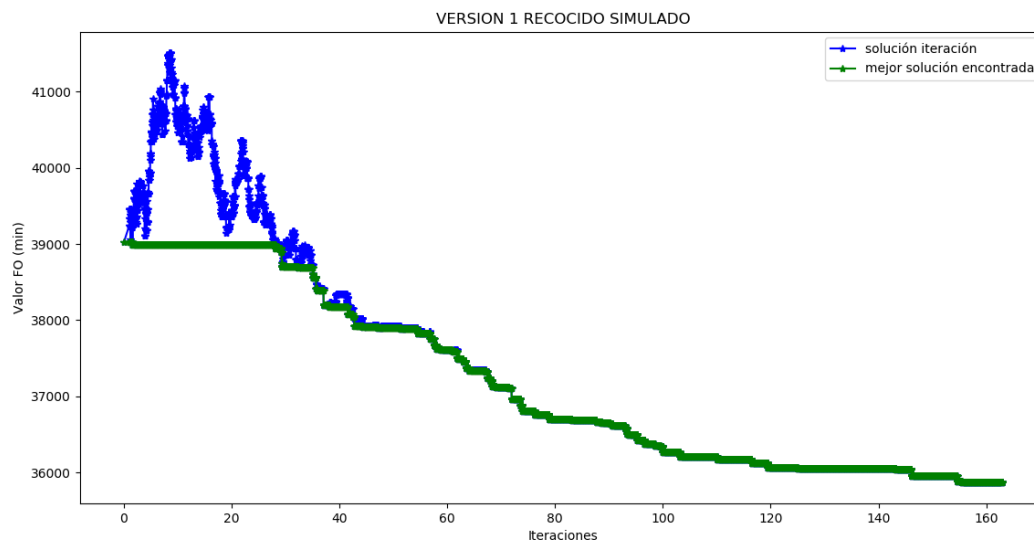


Figura 23: Soluciones obtenidas durante el recocido simulado en la versión 1 del problema

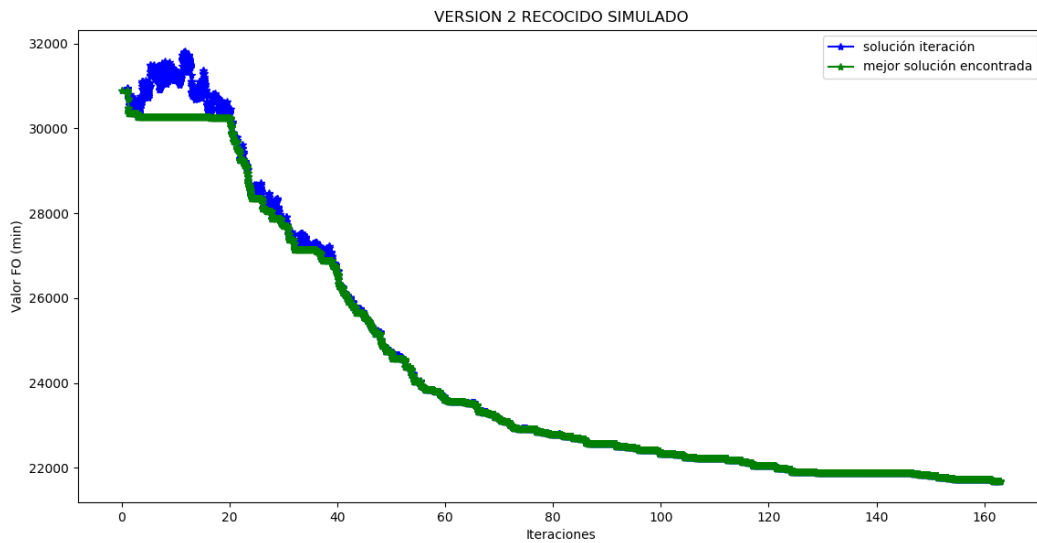


Figura 24: Soluciones obtenidas durante el recocido simulado en la versión 2 del problema

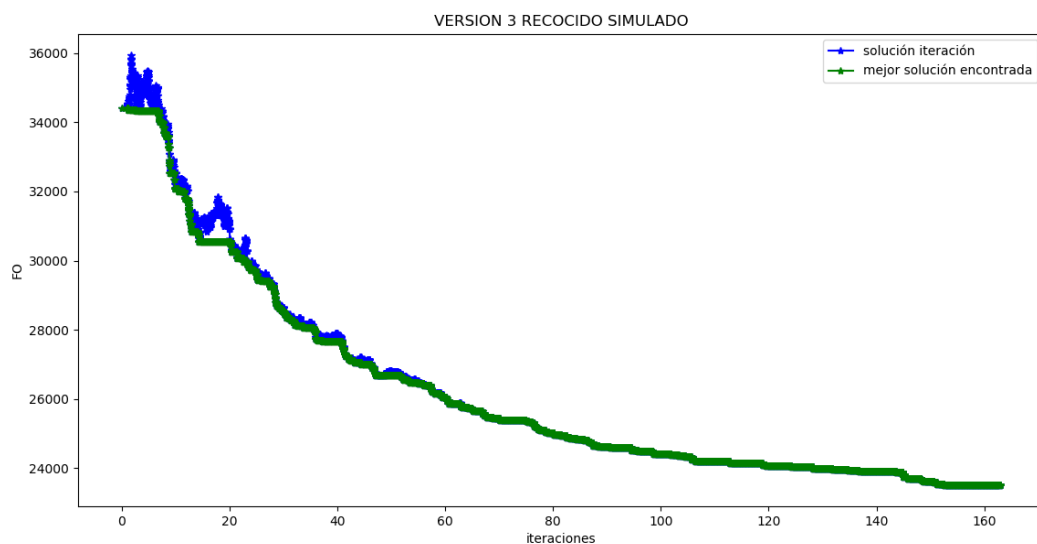


Figura 25: Soluciones obtenidas durante el recocido simulado en la versión 3 del problema

## 5.5 Comparación de resultados

Una vez ya analizados tanto los resultados de la búsqueda tabú como del recocido simulado se procede a realizar una comparativa de estos dos. Habrá que distinguir entre ciertos aspectos que tienen relevancia en la resolución.

En primer lugar, el tiempo computacional del recocido simulado durante las tres variantes resueltas ha sido menor que el obtenido en la búsqueda tabú. Además, acrecentándose esa diferencia en la segunda versión, llegando a mostrar un tiempo computacional casi 4 veces mayor con el método tabú. Por otra parte, ambos coinciden que, a mayor complejidad del programa, mayor tiempo computacional. Es decir, la versión 3 cuyo problema es el más complejo muestra un coste computacional mucho más mayor que el resto.

Por otro lado, se analizan el tiempo total que se emplea en el acarreo de los pedidos asignados y el tamaño de la flota según el método empleado. Así pues, abordando la primera versión se obtiene unos resultados mejores con la búsqueda tabú, presentando una flota de 15 camiones menos y ahorrando casi 165 horas respecto a la solución resuelta por SA. Aunque se emplee un tiempo computacional mayor, el ahorro tanto de tiempo como de flota es

mucho más elevado en la búsqueda tabú y merece la pena incurrir en coste computacional en este caso.

Sin embargo, la segunda variante del problema sigue mostrando mejores tiempos con la búsqueda tabú pero el tamaño de la flota es menor con el segundo método. En este escenario se debería hacer balance si es más rentable la disminución del tiempo total de transporte frente al tamaño de la flota, es decir, compensa más ahorrarse 8 horas de conducción que contar con una flota de 4 camiones menos. Entran en juego el equilibrio entre los costes variables y los costes fijos de la empresa.

Por último, se compara la tercera versión. En esta ocasión se muestra escenarios parecidos entre sí, aunque los mejores valores corresponden con la búsqueda tabú. Dando lugar el casi el mismo número de camiones asignados, donde sólo se diferencia por uno y se produce un ahorro de 13 horas frente al SA. Así pues, en este caso de primeras se optaría por la solución de la búsqueda tabú, pero habría que tener en cuenta que emplea el doble del tiempo de ejecución que en el recocido simulado y en este problema no se trata de tiempos de ejecución excesivos, pero si se aumenta el problema considerablemente. El coste computacional ya empezaría a jugar un papel importante en la búsqueda de la solución.

Para realizar una comparativa más exhausta de los métodos, se compararon los resultados de ambos algoritmos para un tiempo fijo de 3000 segundos. A continuación, se muestra en la siguiente tabla el tiempo total de acarreo obtenido y la flota empleada en cada una de las versiones:

Tabla 52: Resultados alcanzados para un tiempo fijo de 3000 s

Versión	TS		SA	
	Valor FO	$N_k$	Valor FO	$N_k$
<b>V<sub>1</sub></b> : Cada camión solo puede llevar un contenedor	409,7 h	66	393,53 h	69
<b>V<sub>2</sub></b> : Cada camión puede llevar varios contenedores, limitado solo por el tamaño de los mismos	343,71 h	59	323,3 h	57
<b>V<sub>3</sub></b> : Cada camión puede llevar varios contenedores, limitado por tamaño y peso	391,82 h	67	384,97 h	63

Se puede comprobar que el método de la búsqueda tabú tarda más en converger, ya que para un mismo tiempo se obtienen mejores valores de la función objetivo con el recocido simulado. Concretamente cuanto mayor sea la complejidad del problema, la diferencia entre ambos métodos se ve acrecentada como se refleja en la última versión. En cuanto a la primera versión, se obtienen tiempos parecidos, aunque la flota en el caso de la búsqueda tabú es más reducida. Por tanto, se podría concluir que para un mismo tiempo computacional el método del recocido simulado obtiene mejores resultados en todas las variantes del problema de acarreo.

En resumen, ambos métodos presentan ventajas e inconvenientes. El recocido simulado emplea un tiempo computacional menor en todas las variantes del problema estudiado y para un mismo tiempo, los resultados son menores a los obtenidos con el algoritmo tabú. Pero sin embargo, sin fijar un tiempo computacional preestablecido, la búsqueda tabú alcanza los mejores tiempos de acarreo y en la mayoría de los casos acompañado por una flota más reducida. Por consiguiente, en cada caso se debería establecer que factor primaría más, si la rapidez computacional o un valor de la función objetivo menor. Lo eficiente sería buscar un equilibrio entre estos dos, no excederse en el tiempo de ejecución, pero a la vez no sacrificar soluciones más próximas al óptimo global del problema.

# 6 CONCLUSIONES

---

## 6.1 Principales logros alcanzados

A lo largo de este proyecto se ha tratado la importancia de optimizar el transporte de mercancías. Promovido por el esfuerzo de las grandes organizaciones por contar con un buen sistema de transporte que le permita la diferenciación en el mercado. Al abarcar este tema un amplio abanico de posibilidades a tratar se tomó como trabajo de estudio el Acarreo Terrestre.

El problema del acarreo terrestre constituye un tema candente en la logística moderna de contenedores en el ámbito mundial, ya que proporciona una flexibilidad a la hora de entregar la mercancía en una localización exacta que resulta difícil de llevar a cabo por embarcaciones o trenes. Por ende, cualquier mejora implementada en este campo se refleja en un ahorro tanto económico como de tiempo.

Por consiguiente, se centró el estudio en disminuir el tiempo total correspondiente al acarreo terrestre de contenedores de 40 y 20 pies de tamaño. También se incorporó la planificación de la logística de los contenedores vacíos, tema poco abordado en la actualidad e interesante de implementar. Además, se desglosó el problema en tres variantes diferentes:

- Transporte de un contenedor por camión
- Transporte de varios contenedores por camión, limitado por su tamaño
- Transporte de varios contenedores por camión, limitado por su tamaño y peso

Luego, se tomó como fin el ahorro del tiempo total manejado en esta modalidad de transporte y para ello se empleó la Búsqueda Tabú y el método del Recocido Simulado. Posteriormente, se comparó los resultados obtenidos por ambos algoritmos con el fin de comprobar que método se adaptaba mejor al problema planteado.

Una vez examinados los resultados de ambos métodos, se pudo comprobar que eran eficiente y lograba reducir considerablemente el tiempo empleado en el acarreo. Además, los tiempos de ejecución son relativamente pequeños, aunque el coste computacional de la búsqueda tabú era mayor con respecto al recocido simulado. De este modo, para un tiempo computacional fijo, el método del recocido simulado convergía antes y alcanzaba mejores resultados. Sin embargo en los casos donde no se imponía un límite de tiempo de ejecución del programa, el algoritmo tabú mostraba siempre óptimos locales menores frente a la metaheurística del recocido simulado.

Aun así, tanto el método de la búsqueda tabú como la del recocido simulado son adecuados para la resolución del problema, ambos obteniendo soluciones eficientes sin incurrir en un coste computacional elevado.

Otro aspecto de estudio interesante ha sido el análisis de las tres versiones planteadas. Mostrando un ahorro de tiempo y flota considerable al permitir el transporte simultáneo de contenedores de 20 pies, pudiendo llevar a cabo dos órdenes al mismo tiempo. La incorporación de esta variante sería de gran utilidad en el transporte de mercancías mediante el acarreo terrestre. Donde las ventajas de esta se han comprobado analíticamente en el problema resuelto, viendo como mejoraban los resultados entre la primera y segunda versión del problema.

Por último, se estudió el factor del peso por camión, limitación que cada vez está más presente en el transporte por carretera. Al suponer una nueva restricción se restringe ciertos movimientos empleados en la segunda versión que sin embargo en la tercera no se podrían llevar a cabo. Como era de esperar, esta limitación implicó un aumento del tiempo total de acarreo, pero su estudio es de gran relevancia ya que en la realidad se dan estas condiciones en la actualidad.

## 6.2 Líneas de futuro

En cuanto a posibles líneas de futuro de este proyecto, se podría incorporar múltiples variantes al problema. Por ejemplo, sería de gran interés tratar con ventanas temporales, esto haría más complejo el programa. Pero se acercaría más a la realidad, donde los contenedores deben estar en una localización impuesta dentro de un marco

temporal preestablecido.

Además, por otro lado, indicar la posible mejora de los algoritmos tratados e incluso, se podría llevar a cabo la resolución de dicho problema mediante otros métodos. Viendo así las alternativas que ofrecen cada uno y cual sería más eficiente en la búsqueda de la solución óptima. Ya que actualmente existe una innovación y mejora continua en el área de las metaheurísticas, motivada por la capacidad de estos métodos de dar solución a ciertos problemas de optimización que debido a su complejidad no pueden ser resueltos por los métodos convencionales.



# REFERENCIAS

- AGÜERA, E. Y ESCUDERO-SANTANA, A. (2015). Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales Resolución del problema del Acarreo Terrestre con tareas flexibles mediante el uso de Búsqueda Tabú. Trabajo Fin de Grado. Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales. Universidad de Sevilla. Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas II
- BARBAROSOGLU, G., y OZGUR, D. (1999). «A tabu search algorithm for the vehicle routing problem». *Computers & Operations Research* (Vol. 26).
- BARNHART, C., JOHNSON, E. L., NEMHAUSER, G. L., SAVELSBERGH, M. W. P. y VANCE, P. H. (1998). «Branch-and-Price: Column Generation for Solving Huge Integer Programs». *Operations Research*, 46(3), 316–329. <https://doi.org/10.1287/opre.46.3.316>
- BAUTISTA, J. y PEREIRA, J. (2003). «Adaptación de la heurística lin-kerningham para la resolución de problemas de diseño de itinerarios». En: *27 Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa*: 8-11 de abril. Lleida.
- BRAEKERS, K., CARIS, A. y JANSSENS, G. K. (2013). «Integrated planning of loaded and empty container movements». *OR Spectrum*, 35(2), 457–478. <https://doi.org/10.1007/s00291-012-0284-5>
- CAPELLE, T. (2012). *Problema de localización y ruteo con pickup and delivery memoria*. Tesis. Universidad de Chile. Departamento de Ingeniería Civil.
- CARBONEL, T. (2015). «Modelo matemático de planificación de rutas para minimizar los costos del reparto de la empresa san isidro labrador s.r.l. en el año 2015». *Revista de Investigación Estudiantes de Ingeniería*, 05.
- CARDONA, A. (2016). Ventajas y desventajas del transporte ferroviario de mercancías | Sertrans. Retrieved September 25, 2018, from <http://www.sertrans.es/trasporte-terrestre/ventajas-desventajas-transporte-ferroviario-mercancias/>
- CHEUNG, R. K., SHI, N., POWELL, W. B., y SIMAO, H. P. (2008). « An attribute-decision model for cross-border drayage problem». *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(2), 217–234. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2007.07.009>
- CHUNG, K. H., KO, C. S., SHIN, J. Y., HWANG, H., y KIM, K. H. (2007). «Development of mathematical models for the container road transportation in Korean trucking industries». *Computers & Industrial Engineering*, 53(2), 252–262. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.06.0>
- CLARKE, G., y WRIGHT, J. W. (1964). «Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points». *Oper. Res.*, 12(4), 568–581. <https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568>
- COSLOVICH, L., PESENTI, R. y UKOVICH, W. (2006). «Minimizing fleet operating costs for a container transportation company». *European Journal of Operational Research*, 171(3), 776–786. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.09.005>
- DRÉO, J., PÉTROWSKI, A., SIARRY, P. y TAILLARD, E. (2006). *Metaheuristics for Hard Optimization Methods and Case Studies*. Alemania: Ed. Springer
- ESCUADERO, A., MUÑUZURI, J., GUADIX, J., y ARANGO, C. (2013). «Dynamic approach to solve the daily drayage problem with transit time uncertainty». *Computers in Industry*, 64(2), 165–175. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.11.006>
- ESCUADERO-SANTANA, A (2013). Mejoras en el transporte intermodal: optimización en tiempo real del acarreo terrestre. Tesis. Universidad de Sevilla. Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas II.
- GLOVER, F. (1989). «Tabu Search-- Part I». *ORSA Journal on Computing* (Vol. 1).

- GLOVER, F., LAGUNA, M., y MARTI, R. (2008). «Tabu Search». *Tabu Search* (Vol. 16). <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6089-0>
- ILERI, Y., BAZARAA, M., GIFFORD, T., NEMHAUSER, G., SOKOL, J. y WIKUM, E. (2006). «An optimization approach for planning daily drayage operations». *Central European Journal of Operations Research*, 14(2), 141–156. <https://doi.org/10.1007/s10100-006-0165-6>
- IMAI, A., NISHIMURA, E., & CURRENT, J. (2007). «A Lagrangian relaxation-based heuristic for the vehicle routing with full container load». *European Journal of Operational Research*, 176(1), 87–105. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.06.044>
- JAQUE PIRABÁN, A. (2008). «Métodos Aproximados para la Solución del Problema de Enrutamiento de Vehículos (Dic 2008)».
- JIN AI, T., y KACHITVICHYANUKUL, V. (2009). «Particle swarm optimization and two solution representations for solving the capacitated vehicle routing problem». *Computers & Industrial Engineering* (Vol. 56).
- JULA, H., DESSOUKY, M., IOANNOU, P., y CHASSIAKOS, A. (2005). «Container movement by trucks in metropolitan networks: modeling and optimization». *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 41(3), 235–259.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, ; C D, & Vecchi, ; M P. (1983). «Optimization by Simulated Annealing». *New Series* (Vol. 220).
- LAI, M. (2013). *Models and algorithms for the empty container repositioning and its integration with routing problems*. Tesis. University of Cagliari.
- LONG, Y., CHEW, E. P., y LEE, L. H. (2012). «Sample average approximation under non-i.i.d. sampling for stochastic empty container repositioning problem». *OR Spectrum*, 37(2), 389–405. <https://doi.org/10.1007/s00291-015-0389-8>
- LOO, B. P. Y. (2010). «Cross-boundary container truck congestion: the case of the Hong Kong-Pearl River Delta region». *Transportation*, 37(2), 257–274. <https://doi.org/10.1007/s11116-009-9246-4>
- LÜER, A., BENAVENTE, M., BUSTOS, J. y VENEGAS, B. (2009). «El problema de rutas de vehículos: Extensiones y métodos de resolución estado del arte». In *CEUR Workshop Proceedings: 3 y 4 diciembre*. Chile.
- MÁHR, T., SROUR, J., DE WEERDT, M. y ZUIDWIJK, R. (2010). «Can agents measure up? a comparative study of an agent-based and on-line optimization approach for a drayage problem with uncertainty». *Transp Res Part C Emerg Technol* 18(1):99–119
- Martí, R. (2003). «Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria». *Matemáticas*, vol. 1, No 1, p. 3-62
- GLOVER, F., MELIÁN, B., y SÁNCHEZ, F. (2003). «Tabu Search». *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*. No, 19, 29–48.
- METROPOLIS, N., ROSENBLUTH, A. W., ROSENBLUTH, M. N., TELLER, A. H. y TELLER, E. (1953). «Equation of State Calculations by Fast Computing Machines». *Citation: J. Chem. Phys*, 21(6), 1087. <https://doi.org/10.1063/1.1699114>
- Ministerio de Fomento. (n.d.). *ANÁLISIS, INFORMACIÓN Y DIVULGACIÓN SOBRE LA APORTACIÓN DEL TRANSPORTE POR CARRETERA A LA INTERMODALIDAD I El lenguaje del transporte intermodal. Vocabulario ilustrado*. Retrieved from [https://www.fomento.gob.es/recursos\\_mfom/01\\_lenguaje\\_transporte\\_intermodal.pdf](https://www.fomento.gob.es/recursos_mfom/01_lenguaje_transporte_intermodal.pdf)
- Ministerio de Fomento. (2015). *El presente informe monográfico se ha elaborado en la División de Prospectiva y Tecnología del Transporte de la Secretaría General de Transporte, con la colaboración del equipo técnico de*. Retrieved from <http://observatoriotransporte.fomento.es/NR/rdonlyres/695579BB-69F5-4EDE-AF67-1137C80BF1F0/143562/LOGISTICAENESPAÑA.pdf>
- NAMBOOTHIRI, R. y ERERA, A. L. (2008). «Planning local container drayage operations given a port

- access appointment system». *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(2), 185–202. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2007.07.004>
- OLIVERA, A. (2004). *Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos*. Reportes Técnicos 04-08. UR. FI – INCO
- PEREIRA, F. B., TAVARES, J., MACHADO, P., y COSTA, E. (2002). «GVR: a New Genetic Representation for the Vehicle Routing Problem».
- PÉREZ PORTO, J y GARDEY, A. (2010). Definición de transporte - Qué es, Significado y Concepto. Retrieved September 25, 2018, from <https://definicion.de/transporte/>
- POPOVIĆ, D., VIDOVIĆ, M. y NIKOLIĆ, M. (2012). «The Variable Neighborhood Search Heuristic for the Containers Drayage Problem with Time Windows». *2012 online conference on soft computing in industrial applications*, pp 1–10.
- RESTREPO C., JORGE H.; SÁNCHEZ C., J. J. y HOYOS MESA, M. (2004). «Solución al problema de entrega de pedidos utilizando recocido simulado». *Scientia Et Technica* (Vol. X). Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.
- RIOJAS CAÑARI, A. C. y ALVAREZ RIVAS, P. (2005). *Conceptos, algoritmo y aplicación al problema de las N-reinas*. Tesis. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. E.A.P. Investigación Operativa.
- SMILOWITZ, K. (2006). «Multi-resource routing with flexible tasks: an application in drayage operations». *IIE Transactions*, 38(7), 577–590. <https://doi.org/10.1080/07408170500436898>
- STEENKEN, D., VOß, S. y STAHLBOCK, R. (2008). «Container terminal operation and operations research-a classification and literature review». <https://doi.org/10.1007/s00291-003-0157-z>
- STERZIK, S. y KOPFER, H. (2013). «A Tabu Search Heuristic for the Inland Container Transportation Problem». *Computers & Operations Research*, 40(4), 953–962. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.11.015>
- TING, C.-K., y LIAO, X.-L. (2013). «The selective pickup and delivery problem: Formulation and a memetic algorithm». *International Journal of Production Economics*, 141(1), 199–211. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2012.06.009>
- MAYA, P. A. (2003). Revista Facultad de Ingeniería. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 11(46), 11–24.
- VIDOVIC, M., RADIVOJEVIĆ, G., y RAKOVIĆ, B. (2011). «Vehicle routing in containers pickup up and delivery processes». *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20, 335–343. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.039>
- VIS, I. F. A., y DE KOSTER, R. (2003). «Transshipment of containers at a container terminal: An overview». *European Journal of Operational Research*, 147(1), 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00293-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00293-X)
- VOß, S., STAHLBOCK, R. y STEENKEN, D. (2004). «Container terminal operation and operations research - a classification and literature review». *OR Spectrum*, 26(1), 3–49. <https://doi.org/10.1007/s00291-003-0157-z>
- WANG, X., y REGAN, A. C. (2002). «Local truckload pickup and delivery with hard time window constraints». *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(2), 97–112. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(00\)00037-9](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(00)00037-9)
- ZHANG, R., YUN, W. Y. y KOPFER, H. (2015). «Multi-size container transportation by truck: modeling and optimization». *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 27(2–3), 403–430. <https://doi.org/10.1007/s10696-013-9184-5>
- ZHANG, R., YUN, W. Y. y MOON, I. K. (2011). «Modeling and optimization of a container drayage problem with resource constraints». *International Journal of Production Economics*, 133(1), 351–359. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2010.02.005>
- ZHANG, R., YUN, Y., y MOON, I. (2009). «A reactive tabu search algorithm for the multi-depot container

truck transportation problem». *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45, 904–914. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.04.012>

# GLOSARIO

---

CTT: Container Truck Transportation

PDPs: Pick-up and delivery problems

ISO: International Organization for Standardization

MSCTT: Multi-Size Container Truck Transportation

m-TSPTW: multiple-Traveling Salesman Problem with Time Windows

VRP: Vehicle Routing Problem

B & B: Branch & Bound

B&P: Branch and Price

B&C: Branch and Cut

SPP: Set Partitioning Problem

AG: Algoritmos Genéticos

GVR: Genetic Vehicle Representation

CVRP: Capacitated Vehicle Routing Problem

PSO: Particle Swarm Optimization

TS: Taboo Search

IA: Inteligencia Artificial

SA: Simulated Annealing

# ANEXO

Tabla 53: Tipos de pedidos solicitados por cada cliente

CLIENTES	PEDIDOS					
	$O_{IF2}$	$O_{IF4}$	$O_{IE2}$	$O_{IE4}$	$O_{OF2}$	$O_{OF4}$
1	1	1	0	1	1	0
2	0	0	0	1	1	0
3	0	1	1	1	1	1
4	0	0	0	1	1	0
5	1	0	0	1	0	0
6	1	1	0	1	1	0
7	1	1	0	1	1	1
8	0	1	0	0	0	0
9	1	0	1	0	1	1
10	1	0	0	0	0	0
11	1	0	1	0	1	1
12	0	1	1	1	1	1
13	1	1	0	1	0	1
14	0	1	1	1	1	1
15	0	0	1	1	1	0
16	1	1	0	0	0	0
17	0	0	1	1	1	0
18	0	1	1	1	1	0
19	0	0	0	1	1	1
20	1	0	1	1	1	1
21	0	0	1	1	1	1
22	1	0	1	1	0	1
23	1	1	1	1	0	1
24	1	1	0	0	1	0
25	1	0	1	0	0	0
26	1	0	0	0	0	1
27	0	0	1	1	1	1
28	0	1	0	0	0	1
29	1	0	1	1	1	0
30	1	1	0	1	1	0
31	0	1	0	1	0	1
32	0	1	0	0	1	0
33	0	0	1	0	1	0
34	1	0	1	0	1	0
35	0	0	1	0	1	0
36	1	0	1	1	1	0
37	0	0	1	1	0	0
38	1	0	0	0	0	1

39	1	1	1	1	0	0
40	1	1	1	0	1	1
41	0	1	0	0	0	0
42	1	0	1	1	1	1
43	1	1	0	1	0	0
44	0	0	0	0	0	0
45	1	0	0	1	0	0
46	0	1	1	1	1	1
47	0	1	1	1	0	0
48	1	0	0	1	0	1
49	1	0	0	0	0	0
50	1	1	1	0	0	1
51	1	1	0	0	0	1
52	1	1	1	0	0	0
53	1	0	0	0	0	1
54	0	1	0	0	1	0
55	1	0	0	0	0	1
56	0	1	0	1	1	1
57	1	0	1	0	1	0
58	1	1	0	1	0	0
59	1	0	1	0	1	1
60	1	0	1	1	0	1
61	0	1	0	1	0	1
62	0	0	0	1	1	1
63	1	1	0	1	1	0
64	1	0	0	0	1	0
65	0	0	0	1	0	1
66	1	0	0	0	0	0
67	1	0	1	0	0	0
68	0	1	1	1	0	1
69	0	0	1	0	1	1
70	0	0	1	0	0	0
71	1	0	0	1	0	1
72	0	0	0	0	1	0
73	0	1	0	0	1	1
74	0	0	0	0	0	1
75	0	0	1	0	1	1
76	0	0	1	1	1	0
77	1	1	0	0	1	0
78	0	0	0	0	1	1
79	1	1	1	0	1	1
80	1	0	0	0	0	0
81	1	1	1	1	0	1
82	1	1	1	0	1	1
83	1	0	0	0	0	1

<b>84</b>	0	0	0	0	1	0
<b>85</b>	1	0	1	0	0	1
<b>86</b>	1	1	1	1	0	1
<b>87</b>	1	0	1	0	1	0
<b>88</b>	1	1	1	1	0	1
<b>89</b>	0	0	1	1	0	0
<b>90</b>	1	0	0	0	0	1
<b>91</b>	1	1	1	0	0	0
<b>92</b>	1	1	0	1	0	0
<b>93</b>	0	0	0	1	0	0
<b>94</b>	1	1	1	0	1	0
<b>95</b>	1	0	0	1	0	1
<b>96</b>	0	1	1	0	0	0
<b>97</b>	1	0	0	1	0	1
<b>98</b>	1	0	0	0	1	0
<b>99</b>	0	1	0	0	1	0
<b>100</b>	0	0	1	1	1	1

Tabla 54: Tiempo entre las distintas localizaciones en minutos

<b>Clientes</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>
<b>1</b>	0	100	69	17	104	83	105	113	32	67	38	66	106	46	113
<b>2</b>	100	0	105	65	70	41	67	30	20	72	18	30	108	73	30
<b>3</b>	69	105	0	106	27	46	111	20	18	93	31	51	91	59	34
<b>4</b>	17	65	106	0	91	105	78	17	80	18	65	74	10	17	113
<b>5</b>	104	70	27	91	0	80	46	117	20	55	61	57	67	12	87
<b>6</b>	83	41	46	105	80	0	63	37	117	11	61	89	47	30	94
<b>7</b>	105	67	111	78	46	63	0	50	81	84	26	74	59	113	41
<b>8</b>	113	30	20	17	117	37	50	0	47	51	116	74	69	31	80
<b>9</b>	32	20	18	80	20	117	81	47	0	27	38	30	10	85	99
<b>10</b>	67	72	93	18	55	11	84	51	27	0	29	50	104	79	25
<b>11</b>	38	18	31	65	61	61	26	116	38	29	0	96	61	108	49
<b>12</b>	66	30	51	74	57	89	74	74	30	50	96	0	51	61	94
<b>13</b>	106	108	91	10	67	47	59	69	10	104	61	51	0	98	72
<b>14</b>	46	73	59	17	12	30	113	31	85	79	108	61	98	0	21
<b>15</b>	113	30	34	113	87	94	41	80	99	25	49	94	72	21	0
<b>16</b>	15	66	65	11	30	23	41	16	13	114	16	17	94	108	30
<b>17</b>	82	106	60	117	22	60	50	60	27	30	77	119	77	15	73
<b>18</b>	80	46	105	101	112	86	17	100	45	110	64	71	75	32	73
<b>19</b>	74	53	104	74	43	59	21	80	57	35	24	72	37	103	34
<b>20</b>	67	22	17	108	34	24	63	32	56	45	19	68	112	117	107
<b>21</b>	75	101	49	11	74	46	114	59	21	66	95	59	101	88	19
<b>22</b>	75	65	36	103	29	48	120	48	32	91	43	56	97	51	17
<b>23</b>	34	117	108	34	30	92	91	38	77	52	56	118	73	23	117
<b>24</b>	77	95	54	39	15	97	90	74	41	45	99	29	12	13	81



25	84	51	70	38	105	12	73	118	103	84	56	55	46	38	76
26	40	110	71	59	57	107	89	33	99	90	70	79	100	115	21
27	119	119	88	74	103	114	39	58	12	14	47	98	77	38	33
28	120	27	40	76	32	71	14	10	44	34	119	60	111	63	64
29	42	78	96	17	75	47	79	110	75	16	67	92	49	96	55
30	83	112	20	106	108	60	52	87	117	67	37	98	15	48	83
31	65	24	43	53	119	17	13	23	61	98	71	34	50	38	120
32	35	43	36	60	109	59	27	76	19	13	54	108	71	36	50
33	48	118	120	102	13	77	115	71	110	96	66	102	62	114	99
34	120	63	79	118	106	68	59	106	41	45	81	33	112	99	120
35	56	61	12	73	84	97	81	110	62	17	110	49	103	44	26
36	59	111	13	41	79	114	115	84	16	89	65	28	20	97	111
37	60	34	83	86	78	99	115	99	64	68	67	73	49	67	117
38	60	46	100	81	95	45	97	115	69	87	74	33	18	25	69
39	98	67	13	29	22	79	67	27	96	95	85	112	119	19	23
40	26	51	90	76	82	98	95	94	107	76	56	69	42	28	60
41	53	38	29	40	40	46	27	45	114	43	100	87	64	44	95
42	70	95	101	79	32	77	72	42	105	86	63	53	80	84	96
43	73	96	108	48	40	63	50	38	49	77	79	43	47	79	109
44	113	86	68	16	87	91	110	21	45	58	17	99	99	56	35
45	10	15	74	116	72	47	103	114	66	108	83	61	37	40	82
46	41	73	29	81	56	119	87	11	103	113	82	80	22	117	114
47	84	10	14	48	106	48	62	55	39	19	49	84	54	10	119
48	57	13	36	42	18	20	115	83	109	54	46	73	79	97	25
49	75	53	103	39	88	20	87	62	111	99	40	100	76	118	35
50	34	32	105	101	117	31	66	29	52	102	83	45	31	100	12
51	13	30	56	86	46	41	18	14	63	32	64	57	45	37	57
52	103	72	82	25	31	16	114	118	65	15	42	63	43	105	90
53	60	10	115	108	70	47	43	117	23	63	108	24	30	103	114
54	102	33	81	19	27	55	62	62	32	25	32	51	16	84	104
55	105	86	90	71	63	41	87	10	12	27	75	85	21	10	64
56	102	58	110	74	43	63	52	50	83	42	118	52	84	100	50
57	29	34	20	73	33	109	65	42	53	65	87	106	53	89	15
58	118	101	71	32	100	117	35	92	67	39	20	50	24	45	65
59	38	116	25	106	10	110	89	101	93	37	92	11	16	93	15
60	18	38	120	86	73	81	78	109	84	47	16	41	107	110	82
61	87	69	119	43	45	15	42	38	119	12	22	89	22	57	60
62	39	109	71	38	103	83	65	117	120	53	30	54	99	25	86
63	95	113	48	20	48	90	65	119	68	97	114	111	85	19	85
64	62	74	106	76	113	49	76	81	21	87	58	11	35	54	99
65	33	70	86	18	22	35	44	108	78	109	118	71	60	62	69
66	105	21	109	34	54	42	55	87	110	43	17	119	10	67	106
67	22	99	37	114	66	75	11	57	74	58	118	73	78	98	63
68	47	84	18	67	64	45	11	67	88	73	77	95	83	44	61
69	32	22	32	115	71	96	14	102	26	61	43	113	52	36	120

<b>70</b>	32	90	79	92	87	115	34	57	27	19	44	110	58	100	70
<b>71</b>	115	103	62	20	85	18	76	70	80	72	90	52	84	59	45
<b>72</b>	35	14	109	110	13	33	17	72	46	104	19	29	109	114	15
<b>73</b>	65	42	101	42	20	15	40	24	29	117	94	84	77	117	110
<b>74</b>	41	61	94	100	47	117	102	28	14	111	115	27	111	61	112
<b>75</b>	99	98	80	37	10	92	63	79	98	78	103	22	25	63	53
<b>76</b>	96	23	45	35	98	117	80	56	75	27	94	42	78	117	30
<b>77</b>	10	83	61	37	31	33	10	17	26	27	80	24	116	50	79
<b>78</b>	84	113	72	67	106	117	113	108	79	48	89	49	84	35	90
<b>79</b>	92	72	112	40	33	71	107	90	45	31	108	94	46	113	25
<b>80</b>	11	44	40	11	101	88	94	14	120	95	60	89	68	61	25
<b>81</b>	28	56	116	17	112	96	72	58	77	20	110	55	99	38	26
<b>82</b>	24	56	47	72	47	120	120	63	51	42	94	118	15	50	79
<b>83</b>	105	50	26	92	103	58	34	102	43	93	36	56	36	75	64
<b>84</b>	21	29	70	67	103	88	49	35	94	53	23	89	80	120	45
<b>85</b>	103	41	70	50	93	65	119	82	101	42	40	95	114	111	76
<b>86</b>	19	78	83	32	100	71	44	94	78	65	42	72	30	42	106
<b>87</b>	51	72	43	86	48	118	61	31	58	46	18	76	94	37	18
<b>88</b>	62	62	60	103	32	34	13	55	86	41	83	112	76	75	72
<b>89</b>	10	115	88	32	115	81	113	20	25	117	54	48	34	94	12
<b>90</b>	57	58	67	96	13	93	30	31	30	11	14	112	95	69	43
<b>91</b>	79	39	75	17	117	68	102	86	18	70	37	79	28	15	26
<b>92</b>	81	37	79	56	75	119	37	67	52	120	39	75	91	92	39
<b>93</b>	24	83	14	103	11	24	78	74	80	49	13	16	93	68	58
<b>94</b>	83	69	78	93	58	78	27	46	86	120	44	52	111	74	70
<b>95</b>	38	45	75	62	36	104	79	54	47	44	46	17	68	58	87
<b>96</b>	87	26	75	56	27	19	101	30	106	28	19	68	16	17	66
<b>97</b>	118	81	12	97	103	110	36	38	14	41	82	97	90	105	91
<b>98</b>	77	83	101	26	114	105	75	117	68	67	101	49	50	77	102
<b>99</b>	33	61	49	75	20	117	116	12	92	75	25	45	59	50	106
<b>100</b>	56	93	89	65	78	112	32	119	12	17	92	115	30	105	78
<b>depósito</b>	97	66	109	119	55	38	55	29	41	76	86	37	80	35	66
<b>terminal</b>	75	95	24	69	67	85	116	120	76	55	88	76	108	48	101

<b>Clientes</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
<b>1</b>	15	82	80	74	67	75	75	34	77	84	40	119	120	42	83
<b>2</b>	66	106	46	53	22	101	65	117	95	51	110	119	27	78	112
<b>3</b>	65	60	105	104	17	49	36	108	54	70	71	88	40	96	20
<b>4</b>	11	117	101	74	108	11	103	34	39	38	59	74	76	17	106
<b>5</b>	30	22	112	43	34	74	29	30	15	105	57	103	32	75	108
<b>6</b>	23	60	86	59	24	46	48	92	97	12	107	114	71	47	60
<b>7</b>	41	50	17	21	63	114	120	91	90	73	89	39	14	79	52
<b>8</b>	16	60	100	80	32	59	48	38	74	118	33	58	10	110	87
<b>9</b>	13	27	45	57	56	21	32	77	41	103	99	12	44	75	117

10	114	30	110	35	45	66	91	52	45	84	90	14	34	16	67
11	16	77	64	24	19	95	43	56	99	56	70	47	119	67	37
12	17	119	71	72	68	59	56	118	29	55	79	98	60	92	98
13	94	77	75	37	112	101	97	73	12	46	100	77	111	49	15
14	108	15	32	103	117	88	51	23	13	38	115	38	63	96	48
15	30	73	73	34	107	19	17	117	81	76	21	33	64	55	83
16	0	112	75	73	19	18	119	58	43	107	113	97	93	47	113
17	112	0	114	75	52	76	116	44	107	76	22	92	74	112	23
18	75	114	0	91	84	118	37	81	120	64	20	102	18	44	59
19	73	75	91	0	108	106	46	13	11	37	89	32	53	71	108
20	19	52	84	108	0	70	36	65	83	29	54	101	86	113	79
21	18	76	118	106	70	0	64	11	25	73	14	79	85	76	52
22	119	116	37	46	36	64	0	115	51	78	14	67	117	69	56
23	58	44	81	13	65	11	115	0	87	81	103	99	25	20	74
24	43	107	120	11	83	25	51	87	0	89	111	87	69	35	43
25	107	76	64	37	29	73	78	81	89	0	118	37	87	95	74
26	113	22	20	89	54	14	14	103	111	118	0	30	79	45	48
27	97	92	102	32	101	79	67	99	87	37	30	0	94	21	95
28	93	74	18	53	86	85	117	25	69	87	79	94	0	84	51
29	47	112	44	71	113	76	69	20	35	95	45	21	84	0	108
30	113	23	59	108	79	52	56	74	43	74	48	95	51	108	0
31	93	36	39	52	32	11	77	117	32	36	47	50	74	116	118
32	47	27	49	44	45	22	57	12	13	18	100	86	33	33	106
33	88	96	67	92	92	12	90	45	83	11	57	47	54	70	15
34	99	116	77	63	58	103	109	75	43	14	39	86	110	10	27
35	81	33	27	44	39	57	18	53	49	19	97	104	37	10	73
36	78	75	79	98	94	27	57	25	54	67	110	67	83	14	11
37	65	61	72	41	59	34	28	87	37	110	99	93	38	62	116
38	62	20	102	77	60	34	53	51	22	71	119	71	24	97	67
39	51	11	27	55	43	61	31	110	118	93	49	42	113	86	31
40	83	56	109	10	76	64	80	118	14	116	85	94	50	53	48
41	28	20	11	54	22	99	26	70	42	90	23	82	91	77	108
42	100	34	68	59	27	88	58	35	114	118	69	19	76	29	95
43	108	19	19	116	80	16	33	61	57	12	116	32	39	33	45
44	29	56	10	41	48	111	66	58	74	103	11	35	51	57	27
45	27	40	90	112	19	36	29	90	13	63	98	110	30	83	81
46	33	69	119	86	32	17	11	110	101	89	57	109	100	65	72
47	97	106	86	112	93	22	107	72	16	118	80	41	47	69	116
48	87	10	112	39	86	118	117	49	111	85	84	88	92	72	91
49	45	113	58	98	102	17	23	108	12	105	101	120	95	97	83
50	115	15	59	41	21	26	71	10	105	56	56	39	50	84	13
51	88	48	56	113	41	55	70	64	74	11	66	28	89	103	87
52	91	37	105	82	111	29	41	108	106	89	16	99	49	96	93
53	51	13	66	77	40	83	96	61	63	15	73	114	20	14	117
54	26	14	54	112	91	26	82	20	86	110	84	41	120	16	12

55	95	26	75	72	66	48	109	94	79	105	19	30	41	15	79
56	39	84	95	26	26	102	74	111	61	86	39	108	109	56	24
57	17	61	46	87	88	71	101	38	29	35	24	47	34	52	94
58	60	18	120	99	56	108	57	24	32	69	56	55	69	100	21
59	38	75	51	28	34	74	97	111	103	52	52	57	43	92	50
60	68	24	89	50	91	120	39	38	91	27	61	78	107	36	12
61	14	64	95	23	117	29	11	11	45	42	69	47	71	51	18
62	19	101	65	86	67	81	36	63	80	14	80	77	95	31	103
63	24	67	70	99	23	59	52	77	110	96	71	76	25	11	77
64	49	15	23	66	84	93	87	106	65	87	81	39	113	67	27
65	103	111	13	120	47	115	87	35	13	113	101	19	112	90	83
66	78	53	111	24	67	97	24	95	75	53	86	118	61	94	93
67	54	99	96	94	57	116	82	18	65	20	89	81	34	115	105
68	97	15	65	43	97	115	119	36	47	86	109	107	104	80	94
69	21	70	115	66	11	83	113	30	106	92	75	61	109	112	81
70	32	73	20	80	36	22	75	102	72	87	86	13	91	93	31
71	41	39	29	37	52	17	54	25	12	90	13	68	94	67	86
72	111	109	116	76	81	61	72	101	31	67	14	86	38	83	13
73	104	104	89	27	18	14	45	112	73	72	20	37	112	103	51
74	114	46	98	13	88	62	55	102	117	55	61	78	59	108	67
75	13	39	74	70	93	119	101	79	36	42	89	88	61	35	54
76	44	105	85	42	86	114	75	23	23	30	52	62	83	76	72
77	36	105	116	26	57	11	51	69	59	85	45	97	84	83	20
78	100	10	114	88	85	99	89	35	39	75	100	94	16	55	89
79	47	67	45	85	20	68	61	16	118	55	49	71	61	77	41
80	94	60	26	75	108	36	24	95	64	17	92	62	27	92	34
81	30	24	59	34	52	67	14	29	43	96	110	29	62	43	72
82	87	54	19	13	96	12	103	112	49	20	14	15	119	66	17
83	86	106	113	55	64	111	10	16	34	85	114	117	89	15	112
84	96	30	36	53	61	18	11	84	54	111	53	44	111	79	85
85	57	88	84	115	22	86	10	70	29	96	83	83	100	69	56
86	39	49	42	111	48	52	87	76	73	100	28	22	115	13	109
87	74	112	63	88	66	79	71	19	43	118	63	103	47	91	12
88	47	84	29	70	49	60	108	62	77	43	42	68	25	21	114
89	72	36	88	114	37	76	77	11	21	26	78	81	56	111	105
90	18	115	105	106	68	41	16	78	45	112	67	49	32	104	46
91	114	102	54	37	82	76	65	33	57	12	117	97	109	10	48
92	110	31	82	45	78	16	34	16	88	86	12	101	71	103	11
93	102	118	79	19	15	109	103	26	73	86	77	80	27	118	47
94	53	68	61	45	61	95	117	75	97	16	97	75	65	82	101
95	101	84	116	20	107	35	30	70	70	84	49	91	32	10	108
96	15	29	62	118	109	47	60	12	89	45	94	54	28	76	67
97	28	111	53	117	89	61	21	85	27	13	88	65	65	91	70
98	80	86	46	78	54	69	32	77	63	107	57	17	99	28	70
99	50	50	80	90	72	62	73	96	100	38	61	115	80	75	97

<b>100</b>	82	29	87	72	88	19	65	80	28	54	110	93	106	52	105
<b>depósito</b>	34	114	110	50	23	94	58	21	114	115	96	18	75	42	104
<b>terminal</b>	29	25	21	108	115	37	115	16	18	68	80	48	102	35	50
<b>Clientes</b>	<b>31</b>	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>36</b>	<b>37</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	<b>40</b>	<b>41</b>	<b>42</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>45</b>
<b>1</b>	65	35	48	120	56	59	60	60	98	26	53	70	73	113	10
<b>2</b>	24	43	118	63	61	111	34	46	67	51	38	95	96	86	15
<b>3</b>	43	36	120	79	12	13	83	100	13	90	29	101	108	68	74
<b>4</b>	53	60	102	118	73	41	86	81	29	76	40	79	48	16	116
<b>5</b>	119	109	13	106	84	79	78	95	22	82	40	32	40	87	72
<b>6</b>	17	59	77	68	97	114	99	45	79	98	46	77	63	91	47
<b>7</b>	13	27	115	59	81	115	115	97	67	95	27	72	50	110	103
<b>8</b>	23	76	71	106	110	84	99	115	27	94	45	42	38	21	114
<b>9</b>	61	19	110	41	62	16	64	69	96	107	114	105	49	45	66
<b>10</b>	98	13	96	45	17	89	68	87	95	76	43	86	77	58	108
<b>11</b>	71	54	66	81	110	65	67	74	85	56	100	63	79	17	83
<b>12</b>	34	108	102	33	49	28	73	33	112	69	87	53	43	99	61
<b>13</b>	50	71	62	112	103	20	49	18	119	42	64	80	47	99	37
<b>14</b>	38	36	114	99	44	97	67	25	19	28	44	84	79	56	40
<b>15</b>	120	50	99	120	26	111	117	69	23	60	95	96	109	35	82
<b>16</b>	93	47	88	99	81	78	65	62	51	83	28	100	108	29	27
<b>17</b>	36	27	96	116	33	75	61	20	11	56	20	34	19	56	40
<b>18</b>	39	49	67	77	27	79	72	102	27	109	11	68	19	10	90
<b>19</b>	52	44	92	63	44	98	41	77	55	10	54	59	116	41	112
<b>20</b>	32	45	92	58	39	94	59	60	43	76	22	27	80	48	19
<b>21</b>	11	22	12	103	57	27	34	34	61	64	99	88	16	111	36
<b>22</b>	77	57	90	109	18	57	28	53	31	80	26	58	33	66	29
<b>23</b>	117	12	45	75	53	25	87	51	110	118	70	35	61	58	90
<b>24</b>	32	13	83	43	49	54	37	22	118	14	42	114	57	74	13
<b>25</b>	36	18	11	14	19	67	110	71	93	116	90	118	12	103	63
<b>26</b>	47	100	57	39	97	110	99	119	49	85	23	69	116	11	98
<b>27</b>	50	86	47	86	104	67	93	71	42	94	82	19	32	35	110
<b>28</b>	74	33	54	110	37	83	38	24	113	50	91	76	39	51	30
<b>29</b>	116	33	70	10	10	14	62	97	86	53	77	29	33	57	83
<b>30</b>	118	106	15	27	73	11	116	67	31	48	108	95	45	27	81
<b>31</b>	0	16	42	102	74	22	83	86	17	43	57	82	93	101	66
<b>32</b>	16	0	99	89	98	118	51	104	14	92	17	111	65	29	29
<b>33</b>	42	99	0	19	66	101	67	96	18	99	31	103	100	103	117
<b>34</b>	102	89	19	0	14	119	56	117	76	32	75	33	120	99	33
<b>35</b>	74	98	66	14	0	37	39	74	19	116	30	100	10	66	96
<b>36</b>	22	118	101	119	37	0	108	20	13	51	64	66	62	27	27
<b>37</b>	83	51	67	56	39	108	0	59	106	63	35	72	67	72	92
<b>38</b>	86	104	96	117	74	20	59	0	113	87	97	19	22	67	46
<b>39</b>	17	14	18	76	19	13	106	113	0	83	41	79	86	96	45
<b>40</b>	43	92	99	32	116	51	63	87	83	0	64	107	10	80	36

41	57	17	31	75	30	64	35	97	41	64	0	19	29	19	91
42	82	111	103	33	100	66	72	19	79	107	19	0	49	68	119
43	93	65	100	120	10	62	67	22	86	10	29	49	0	93	73
44	101	29	103	99	66	27	72	67	96	80	19	68	93	0	70
45	66	29	117	33	96	27	92	46	45	36	91	119	73	70	0
46	59	36	88	115	90	51	36	81	87	38	70	86	109	115	16
47	34	40	104	62	103	74	99	16	48	29	41	49	65	112	47
48	89	92	44	70	64	87	86	95	95	13	77	70	112	108	47
49	55	36	68	61	92	92	65	100	90	71	96	80	22	46	116
50	60	115	93	20	34	35	88	89	71	68	10	65	10	85	52
51	73	113	26	95	11	22	84	17	111	106	96	38	43	15	45
52	113	58	45	84	68	30	74	72	107	50	77	99	114	95	66
53	43	88	54	92	10	107	119	79	67	109	47	79	102	119	70
54	47	110	98	73	115	120	94	16	12	54	103	119	29	88	58
55	60	52	29	89	61	20	118	62	72	13	46	38	35	27	11
56	31	89	114	112	107	45	60	56	113	113	86	94	68	31	49
57	96	25	80	47	62	82	85	58	97	118	35	15	120	85	82
58	26	40	42	44	36	40	52	38	43	48	31	43	42	55	108
59	105	13	42	83	81	19	59	116	118	101	109	117	25	93	100
60	67	97	30	90	24	53	58	55	61	25	82	50	82	40	95
61	23	107	61	58	21	75	70	108	89	48	108	41	109	76	14
62	117	10	42	70	115	102	11	32	45	66	95	24	49	120	113
63	87	62	32	92	17	38	85	79	63	107	67	12	86	110	27
64	18	109	16	99	74	12	22	54	33	78	63	81	91	72	84
65	57	34	72	58	29	35	64	16	68	39	120	72	101	108	115
66	94	110	64	63	105	38	102	114	18	99	67	117	54	26	101
67	103	79	81	26	53	117	116	90	100	110	33	39	10	12	16
68	69	93	20	57	32	66	90	59	19	109	71	46	103	90	82
69	46	19	75	21	101	21	39	18	98	39	80	112	86	81	47
70	56	33	85	65	109	63	19	41	36	118	113	55	62	117	37
71	120	57	100	24	49	72	15	79	92	55	35	114	79	65	113
72	11	14	63	104	40	76	35	95	114	107	88	52	87	72	48
73	33	49	116	100	26	71	89	107	37	41	59	87	91	88	85
74	14	92	25	106	18	107	21	38	102	109	94	54	12	15	29
75	75	78	71	40	17	55	114	120	62	28	100	113	33	31	21
76	55	50	15	75	66	98	21	113	86	38	14	16	78	19	69
77	106	91	24	69	28	31	58	97	118	80	64	48	83	28	71
78	96	113	24	100	55	51	106	39	98	120	77	63	55	56	95
79	82	44	111	85	48	75	53	78	110	73	25	77	53	96	116
80	116	29	102	81	69	48	58	109	48	46	98	83	117	62	40
81	24	17	118	120	69	92	38	108	13	21	27	94	66	41	59
82	37	102	76	39	91	50	111	53	54	89	49	84	38	26	21
83	104	37	28	103	38	70	86	116	85	101	41	72	85	81	51
84	26	16	97	45	104	60	74	97	85	13	11	101	31	118	14
85	88	34	39	43	62	103	81	12	88	85	84	117	32	101	56

<b>86</b>	44	13	70	45	114	16	57	47	93	24	33	101	34	76	45
<b>87</b>	35	40	21	72	107	25	38	73	104	89	12	64	35	62	101
<b>88</b>	50	11	111	119	118	65	39	112	95	18	79	61	100	33	40
<b>89</b>	90	115	34	109	25	44	11	32	48	24	91	22	22	29	44
<b>90</b>	43	92	60	76	28	120	24	30	26	19	28	32	100	69	10
<b>91</b>	68	77	113	39	72	78	27	16	64	74	33	102	30	101	116
<b>92</b>	90	108	11	69	44	59	16	100	74	75	32	86	54	31	116
<b>93</b>	33	81	78	119	104	51	55	65	93	57	16	31	105	12	53
<b>94</b>	33	118	50	86	88	43	23	110	115	100	56	93	91	63	26
<b>95</b>	49	30	20	110	101	43	78	67	32	116	90	111	49	61	14
<b>96</b>	99	31	108	85	72	79	78	107	56	64	16	68	84	13	117
<b>97</b>	103	113	45	79	106	111	22	83	100	99	101	63	61	29	46
<b>98</b>	59	107	100	44	114	63	102	114	87	65	48	73	44	38	64
<b>99</b>	13	20	118	82	111	97	37	108	48	112	37	66	98	30	87
<b>100</b>	55	90	75	31	51	68	12	112	36	62	119	105	118	104	13
<b>depósito</b>	115	44	59	75	119	43	23	39	31	100	26	95	83	98	109
<b>terminal</b>	41	96	10	18	42	51	100	32	109	120	51	114	101	63	55

<b>Clientes</b>	<b>46</b>	<b>47</b>	<b>48</b>	<b>49</b>	<b>50</b>	<b>51</b>	<b>52</b>	<b>53</b>	<b>54</b>	<b>55</b>	<b>56</b>	<b>57</b>	<b>58</b>	<b>59</b>	<b>60</b>
<b>1</b>	41	84	57	75	34	13	103	60	102	105	102	29	118	38	18
<b>2</b>	73	10	13	53	32	30	72	10	33	86	58	34	101	116	38
<b>3</b>	29	14	36	103	105	56	82	115	81	90	110	20	71	25	120
<b>4</b>	81	48	42	39	101	86	25	108	19	71	74	73	32	106	86
<b>5</b>	56	106	18	88	117	46	31	70	27	63	43	33	100	10	73
<b>6</b>	119	48	20	20	31	41	16	47	55	41	63	109	117	110	81
<b>7</b>	87	62	115	87	66	18	114	43	62	87	52	65	35	89	78
<b>8</b>	11	55	83	62	29	14	118	117	62	10	50	42	92	101	109
<b>9</b>	103	39	109	111	52	63	65	23	32	12	83	53	67	93	84
<b>10</b>	113	19	54	99	102	32	15	63	25	27	42	65	39	37	47
<b>11</b>	82	49	46	40	83	64	42	108	32	75	118	87	20	92	16
<b>12</b>	80	84	73	100	45	57	63	24	51	85	52	106	50	11	41
<b>13</b>	22	54	79	76	31	45	43	30	16	21	84	53	24	16	107
<b>14</b>	117	10	97	118	100	37	105	103	84	10	100	89	45	93	110
<b>15</b>	114	119	25	35	12	57	90	114	104	64	50	15	65	15	82
<b>16</b>	33	97	87	45	115	88	91	51	26	95	39	17	60	38	68
<b>17</b>	69	106	10	113	15	48	37	13	14	26	84	61	18	75	24
<b>18</b>	119	86	112	58	59	56	105	66	54	75	95	46	120	51	89
<b>19</b>	86	112	39	98	41	113	82	77	112	72	26	87	99	28	50
<b>20</b>	32	93	86	102	21	41	111	40	91	66	26	88	56	34	91
<b>21</b>	17	22	118	17	26	55	29	83	26	48	102	71	108	74	120
<b>22</b>	11	107	117	23	71	70	41	96	82	109	74	101	57	97	39
<b>23</b>	110	72	49	108	10	64	108	61	20	94	111	38	24	111	38
<b>24</b>	101	16	111	12	105	74	106	63	86	79	61	29	32	103	91
<b>25</b>	89	118	85	105	56	11	89	15	110	105	86	35	69	52	27
<b>26</b>	57	80	84	101	56	66	16	73	84	19	39	24	56	52	61

27	109	41	88	120	39	28	99	114	41	30	108	47	55	57	78
28	100	47	92	95	50	89	49	20	120	41	109	34	69	43	107
29	65	69	72	97	84	103	96	14	16	15	56	52	100	92	36
30	72	116	91	83	13	87	93	117	12	79	24	94	21	50	12
31	59	34	89	55	60	73	113	43	47	60	31	96	26	105	67
32	36	40	92	36	115	113	58	88	110	52	89	25	40	13	97
33	88	104	44	68	93	26	45	54	98	29	114	80	42	42	30
34	115	62	70	61	20	95	84	92	73	89	112	47	44	83	90
35	90	103	64	92	34	11	68	10	115	61	107	62	36	81	24
36	51	74	87	92	35	22	30	107	120	20	45	82	40	19	53
37	36	99	86	65	88	84	74	119	94	118	60	85	52	59	58
38	81	16	95	100	89	17	72	79	16	62	56	58	38	116	55
39	87	48	95	90	71	111	107	67	12	72	113	97	43	118	61
40	38	29	13	71	68	106	50	109	54	13	113	118	48	101	25
41	70	41	77	96	10	96	77	47	103	46	86	35	31	109	82
42	86	49	70	80	65	38	99	79	119	38	94	15	43	117	50
43	109	65	112	22	10	43	114	102	29	35	68	120	42	25	82
44	115	112	108	46	85	15	95	119	88	27	31	85	55	93	40
45	16	47	47	116	52	45	66	70	58	11	49	82	108	100	95
46	0	72	35	39	105	24	14	91	88	107	118	27	28	113	116
47	72	0	72	51	81	46	82	83	33	61	35	50	64	64	10
48	35	72	0	96	77	54	120	118	56	115	95	68	58	42	11
49	39	51	96	0	107	119	53	10	20	48	80	39	12	119	18
50	105	81	77	107	0	25	93	53	115	46	48	19	46	89	53
51	24	46	54	119	25	0	59	81	46	62	48	88	75	11	95
52	14	82	120	53	93	59	0	12	119	24	46	56	60	56	50
53	91	83	118	10	53	81	12	0	30	58	97	20	84	119	69
54	88	33	56	20	115	46	119	30	0	112	95	61	58	93	105
55	107	61	115	48	46	62	24	58	112	0	86	24	59	58	46
56	118	35	95	80	48	48	46	97	95	86	0	105	77	22	115
57	27	50	68	39	19	88	56	20	61	24	105	0	69	71	102
58	28	64	58	12	46	75	60	84	58	59	77	69	0	104	114
59	113	64	42	119	89	11	56	119	93	58	22	71	104	0	66
60	116	10	11	18	53	95	50	69	105	46	115	102	114	66	0
61	59	63	64	24	106	112	117	102	84	46	97	100	45	16	118
62	13	24	93	114	96	94	37	117	60	113	86	43	74	12	108
63	108	94	53	116	64	87	12	83	33	17	81	29	72	116	58
64	76	60	84	72	90	99	90	74	89	31	95	65	18	97	117
65	87	58	39	26	20	108	26	95	32	80	14	93	65	40	68
66	53	61	66	29	67	109	117	41	97	108	114	93	75	60	73
67	98	109	120	29	89	59	21	85	36	93	119	12	31	17	33
68	116	76	89	35	92	103	95	43	48	19	62	21	33	98	15
69	113	64	81	39	107	115	120	51	36	59	104	105	15	65	26
70	106	87	48	114	24	85	73	116	111	86	36	120	72	40	118
71	81	109	39	28	52	27	25	120	80	23	57	26	91	12	84



<b>72</b>	82	63	120	103	33	57	71	110	119	15	73	106	92	72	87
<b>73</b>	53	77	36	62	13	117	75	68	37	94	64	37	71	96	48
<b>74</b>	68	106	69	72	79	80	95	73	76	43	46	107	39	86	107
<b>75</b>	88	112	58	65	22	23	73	17	60	73	93	73	58	82	83
<b>76</b>	40	101	82	97	78	66	22	67	97	93	30	87	100	40	58
<b>77</b>	91	106	45	119	36	102	56	104	89	56	43	73	39	82	42
<b>78</b>	50	81	13	96	102	115	64	30	55	47	56	90	87	86	13
<b>79</b>	97	39	13	75	58	12	107	30	114	64	117	72	102	20	68
<b>80</b>	74	112	107	109	92	70	69	44	25	89	55	34	112	92	118
<b>81</b>	108	114	106	116	106	44	41	65	99	84	61	60	70	87	116
<b>82</b>	106	45	56	20	92	79	72	117	27	98	119	65	36	110	66
<b>83</b>	54	106	103	113	56	19	71	71	90	40	53	42	112	83	110
<b>84</b>	78	17	22	49	96	85	26	30	50	38	70	75	100	82	79
<b>85</b>	65	71	55	68	59	86	57	89	95	32	10	35	77	100	18
<b>86</b>	15	44	118	102	96	22	48	54	22	76	15	113	118	25	68
<b>87</b>	109	17	52	36	50	93	14	97	26	80	112	69	98	68	57
<b>88</b>	66	97	17	59	32	32	15	79	98	78	25	105	120	27	87
<b>89</b>	118	112	87	72	43	39	63	114	52	70	55	98	45	16	31
<b>90</b>	68	73	61	36	83	78	33	73	93	110	49	53	69	84	84
<b>91</b>	74	11	91	82	100	48	111	39	55	48	108	118	52	120	56
<b>92</b>	79	115	15	108	71	44	69	104	12	117	92	46	63	63	42
<b>93</b>	50	26	94	51	118	41	111	111	117	29	111	31	119	58	52
<b>94</b>	47	34	118	54	17	85	81	35	108	59	37	22	53	60	53
<b>95</b>	71	97	84	13	10	20	79	33	60	12	69	80	24	40	97
<b>96</b>	107	112	22	26	37	89	44	25	73	81	56	95	37	42	120
<b>97</b>	104	38	47	76	107	97	10	47	47	46	70	18	48	59	72
<b>98</b>	57	71	39	100	92	113	32	103	27	93	27	94	76	51	113
<b>99</b>	106	72	61	76	76	111	31	86	111	77	23	97	51	80	63
<b>100</b>	23	88	64	72	114	28	80	104	57	62	115	81	51	46	38
<b>depósito</b>	116	43	100	106	119	12	81	111	59	54	96	39	95	70	12
<b>terminal</b>	50	58	88	104	88	89	67	26	96	39	89	118	55	39	14

<b>Clientes</b>	<b>61</b>	<b>62</b>	<b>63</b>	<b>64</b>	<b>65</b>	<b>66</b>	<b>67</b>	<b>68</b>	<b>69</b>	<b>70</b>	<b>71</b>	<b>72</b>	<b>73</b>	<b>74</b>	<b>75</b>
<b>1</b>	87	39	95	62	33	105	22	47	32	32	115	35	65	41	99
<b>2</b>	69	109	113	74	70	21	99	84	22	90	103	14	42	61	98
<b>3</b>	119	71	48	106	86	109	37	18	32	79	62	109	101	94	80
<b>4</b>	43	38	20	76	18	34	114	67	115	92	20	110	42	100	37
<b>5</b>	45	103	48	113	22	54	66	64	71	87	85	13	20	47	10
<b>6</b>	15	83	90	49	35	42	75	45	96	115	18	33	15	117	92
<b>7</b>	42	65	65	76	44	55	11	11	14	34	76	17	40	102	63
<b>8</b>	38	117	119	81	108	87	57	67	102	57	70	72	24	28	79
<b>9</b>	119	120	68	21	78	110	74	88	26	27	80	46	29	14	98
<b>10</b>	12	53	97	87	109	43	58	73	61	19	72	104	117	111	78
<b>11</b>	22	30	114	58	118	17	118	77	43	44	90	19	94	115	103
<b>12</b>	89	54	111	11	71	119	73	95	113	110	52	29	84	27	22

13	22	99	85	35	60	10	78	83	52	58	84	109	77	111	25
14	57	25	19	54	62	67	98	44	36	100	59	114	117	61	63
15	60	86	85	99	69	106	63	61	120	70	45	15	110	112	53
16	14	19	24	49	103	78	54	97	21	32	41	111	104	114	13
17	64	101	67	15	111	53	99	15	70	73	39	109	104	46	39
18	95	65	70	23	13	111	96	65	115	20	29	116	89	98	74
19	23	86	99	66	120	24	94	43	66	80	37	76	27	13	70
20	117	67	23	84	47	67	57	97	11	36	52	81	18	88	93
21	29	81	59	93	115	97	116	115	83	22	17	61	14	62	119
22	11	36	52	87	87	24	82	119	113	75	54	72	45	55	101
23	11	63	77	106	35	95	18	36	30	102	25	101	112	102	79
24	45	80	110	65	13	75	65	47	106	72	12	31	73	117	36
25	42	14	96	87	113	53	20	86	92	87	90	67	72	55	42
26	69	80	71	81	101	86	89	109	75	86	13	14	20	61	89
27	47	77	76	39	19	118	81	107	61	13	68	86	37	78	88
28	71	95	25	113	112	61	34	104	109	91	94	38	112	59	61
29	51	31	11	67	90	94	115	80	112	93	67	83	103	108	35
30	18	103	77	27	83	93	105	94	81	31	86	13	51	67	54
31	23	117	87	18	57	94	103	69	46	56	120	11	33	14	75
32	107	10	62	109	34	110	79	93	19	33	57	14	49	92	78
33	61	42	32	16	72	64	81	20	75	85	100	63	116	25	71
34	58	70	92	99	58	63	26	57	21	65	24	104	100	106	40
35	21	115	17	74	29	105	53	32	101	109	49	40	26	18	17
36	75	102	38	12	35	38	117	66	21	63	72	76	71	107	55
37	70	11	85	22	64	102	116	90	39	19	15	35	89	21	114
38	108	32	79	54	16	114	90	59	18	41	79	95	107	38	120
39	89	45	63	33	68	18	100	19	98	36	92	114	37	102	62
40	48	66	107	78	39	99	110	109	39	118	55	107	41	109	28
41	108	95	67	63	120	67	33	71	80	113	35	88	59	94	100
42	41	24	12	81	72	117	39	46	112	55	114	52	87	54	113
43	109	49	86	91	101	54	10	103	86	62	79	87	91	12	33
44	76	120	110	72	108	26	12	90	81	117	65	72	88	15	31
45	14	113	27	84	115	101	16	82	47	37	113	48	85	29	21
46	59	13	108	76	87	53	98	116	113	106	81	82	53	68	88
47	63	24	94	60	58	61	109	76	64	87	109	63	77	106	112
48	64	93	53	84	39	66	120	89	81	48	39	120	36	69	58
49	24	114	116	72	26	29	29	35	39	114	28	103	62	72	65
50	106	96	64	90	20	67	89	92	107	24	52	33	13	79	22
51	112	94	87	99	108	109	59	103	115	85	27	57	117	80	23
52	117	37	12	90	26	117	21	95	120	73	25	71	75	95	73
53	102	117	83	74	95	41	85	43	51	116	120	110	68	73	17
54	84	60	33	89	32	97	36	48	36	111	80	119	37	76	60
55	46	113	17	31	80	108	93	19	59	86	23	15	94	43	73
56	97	86	81	95	14	114	119	62	104	36	57	73	64	46	93
57	100	43	29	65	93	93	12	21	105	120	26	106	37	107	73

<b>58</b>	45	74	72	18	65	75	31	33	15	72	91	92	71	39	58
<b>59</b>	16	12	116	97	40	60	17	98	65	40	12	72	96	86	82
<b>60</b>	118	108	58	117	68	73	33	15	26	118	84	87	48	107	83
<b>61</b>	0	104	35	48	61	76	55	100	12	66	35	66	44	117	116
<b>62</b>	104	0	113	12	93	32	47	74	93	113	86	82	21	23	83
<b>63</b>	35	113	0	37	15	32	89	119	68	52	61	37	80	68	42
<b>64</b>	48	12	37	0	11	70	89	59	32	73	87	46	33	52	65
<b>65</b>	61	93	15	11	0	48	37	67	62	34	76	65	48	10	75
<b>66</b>	76	32	32	70	48	0	12	120	75	60	77	11	53	27	86
<b>67</b>	55	47	89	89	37	12	0	109	11	13	115	108	40	54	47
<b>68</b>	100	74	119	59	67	120	109	0	35	96	16	23	52	88	31
<b>69</b>	12	93	68	32	62	75	11	35	0	62	103	98	55	60	85
<b>70</b>	66	113	52	73	34	60	13	96	62	0	24	26	23	107	46
<b>71</b>	35	86	61	87	76	77	115	16	103	24	0	78	59	96	41
<b>72</b>	66	82	37	46	65	11	108	23	98	26	78	0	75	31	53
<b>73</b>	44	21	80	33	48	53	40	52	55	23	59	75	0	77	79
<b>74</b>	117	23	68	52	10	27	54	88	60	107	96	31	77	0	87
<b>75</b>	116	83	42	65	75	86	47	31	85	46	41	53	79	87	0
<b>76</b>	63	31	28	96	21	27	110	75	39	118	110	75	79	66	72
<b>77</b>	90	22	32	31	55	25	73	53	110	81	81	103	84	63	84
<b>78</b>	77	97	92	58	14	16	32	30	94	45	65	77	69	46	94
<b>79</b>	77	55	104	109	115	81	46	109	16	68	70	73	87	110	77
<b>80</b>	45	29	39	96	72	91	51	17	106	16	34	45	43	25	66
<b>81</b>	15	12	82	67	12	108	64	85	111	101	112	48	21	14	68
<b>82</b>	87	107	101	62	59	81	50	87	45	28	22	47	46	56	110
<b>83</b>	106	41	14	97	84	25	71	73	28	65	107	76	31	106	70
<b>84</b>	59	11	102	66	22	58	95	32	67	52	29	13	110	63	41
<b>85</b>	42	28	31	88	73	28	17	34	47	40	24	32	45	28	74
<b>86</b>	33	16	57	41	114	53	56	81	58	78	41	31	75	26	76
<b>87</b>	43	31	116	73	70	14	22	118	55	71	120	63	23	69	33
<b>88</b>	115	74	14	69	10	104	55	114	114	16	11	99	40	17	37
<b>89</b>	16	20	40	46	60	22	68	99	55	81	98	35	64	63	31
<b>90</b>	69	104	107	76	106	46	63	114	60	119	91	38	22	91	66
<b>91</b>	81	81	112	20	26	17	120	91	38	52	12	20	39	49	117
<b>92</b>	114	83	88	113	90	60	44	120	73	105	67	81	88	84	16
<b>93</b>	101	25	99	99	76	55	77	114	68	93	24	31	26	19	57
<b>94</b>	118	33	18	54	10	100	120	117	82	86	49	24	110	93	74
<b>95</b>	15	32	76	68	39	44	17	45	76	88	83	93	109	110	97
<b>96</b>	13	55	55	106	26	112	81	68	105	98	36	89	63	92	118
<b>97</b>	91	81	16	100	87	11	120	79	88	100	14	90	115	64	22
<b>98</b>	17	17	49	75	48	35	101	76	77	60	32	70	48	50	26
<b>99</b>	77	82	54	44	31	118	54	103	12	73	51	103	92	10	23
<b>100</b>	88	64	33	86	115	36	34	61	119	102	95	75	89	61	42
<b>depósito</b>	59	80	98	83	39	92	119	91	110	90	62	85	41	44	65
<b>terminal</b>	62	94	99	73	43	119	21	81	50	107	86	50	29	93	80

<b>Cientes</b>	<b>76</b>	<b>77</b>	<b>78</b>	<b>79</b>	<b>80</b>	<b>81</b>	<b>82</b>	<b>83</b>	<b>84</b>	<b>85</b>	<b>86</b>	<b>87</b>	<b>88</b>	<b>89</b>	<b>90</b>
<b>1</b>	96	10	84	92	11	28	24	105	21	103	19	51	62	10	57
<b>2</b>	23	83	113	72	44	56	56	50	29	41	78	72	62	115	58
<b>3</b>	45	61	72	112	40	116	47	26	70	70	83	43	60	88	67
<b>4</b>	35	37	67	40	11	17	72	92	67	50	32	86	103	32	96
<b>5</b>	98	31	106	33	101	112	47	103	103	93	100	48	32	115	13
<b>6</b>	117	33	117	71	88	96	120	58	88	65	71	118	34	81	93
<b>7</b>	80	10	113	107	94	72	120	34	49	119	44	61	13	113	30
<b>8</b>	56	17	108	90	14	58	63	102	35	82	94	31	55	20	31
<b>9</b>	75	26	79	45	120	77	51	43	94	101	78	58	86	25	30
<b>10</b>	27	27	48	31	95	20	42	93	53	42	65	46	41	117	11
<b>11</b>	94	80	89	108	60	110	94	36	23	40	42	18	83	54	14
<b>12</b>	42	24	49	94	89	55	118	56	89	95	72	76	112	48	112
<b>13</b>	78	116	84	46	68	99	15	36	80	114	30	94	76	34	95
<b>14</b>	117	50	35	113	61	38	50	75	120	111	42	37	75	94	69
<b>15</b>	30	79	90	25	25	26	79	64	45	76	106	18	72	12	43
<b>16</b>	44	36	100	47	94	30	87	86	96	57	39	74	47	72	18
<b>17</b>	105	105	10	67	60	24	54	106	30	88	49	112	84	36	115
<b>18</b>	85	116	114	45	26	59	19	113	36	84	42	63	29	88	105
<b>19</b>	42	26	88	85	75	34	13	55	53	115	111	88	70	114	106
<b>20</b>	86	57	85	20	108	52	96	64	61	22	48	66	49	37	68
<b>21</b>	114	11	99	68	36	67	12	111	18	86	52	79	60	76	41
<b>22</b>	75	51	89	61	24	14	103	10	11	10	87	71	108	77	16
<b>23</b>	23	69	35	16	95	29	112	16	84	70	76	19	62	11	78
<b>24</b>	23	59	39	118	64	43	49	34	54	29	73	43	77	21	45
<b>25</b>	30	85	75	55	17	96	20	85	111	96	100	118	43	26	112
<b>26</b>	52	45	100	49	92	110	14	114	53	83	28	63	42	78	67
<b>27</b>	62	97	94	71	62	29	15	117	44	83	22	103	68	81	49
<b>28</b>	83	84	16	61	27	62	119	89	111	100	115	47	25	56	32
<b>29</b>	76	83	55	77	92	43	66	15	79	69	13	91	21	111	104
<b>30</b>	72	20	89	41	34	72	17	112	85	56	109	12	114	105	46
<b>31</b>	55	106	96	82	116	24	37	104	26	88	44	35	50	90	43
<b>32</b>	50	91	113	44	29	17	102	37	16	34	13	40	11	115	92
<b>33</b>	15	24	24	111	102	118	76	28	97	39	70	21	111	34	60
<b>34</b>	75	69	100	85	81	120	39	103	45	43	45	72	119	109	76
<b>35</b>	66	28	55	48	69	69	91	38	104	62	114	107	118	25	28
<b>36</b>	98	31	51	75	48	92	50	70	60	103	16	25	65	44	120
<b>37</b>	21	58	106	53	58	38	111	86	74	81	57	38	39	11	24
<b>38</b>	113	97	39	78	109	108	53	116	97	12	47	73	112	32	30
<b>39</b>	86	118	98	110	48	13	54	85	85	88	93	104	95	48	26
<b>40</b>	38	80	120	73	46	21	89	101	13	85	24	89	18	24	19
<b>41</b>	14	64	77	25	98	27	49	41	11	84	33	12	79	91	28
<b>42</b>	16	48	63	77	83	94	84	72	101	117	101	64	61	22	32

43	78	83	55	53	117	66	38	85	31	32	34	35	100	22	100
44	19	28	56	96	62	41	26	81	118	101	76	62	33	29	69
45	69	71	95	116	40	59	21	51	14	56	45	101	40	44	10
46	40	91	50	97	74	108	106	54	78	65	15	109	66	118	68
47	101	106	81	39	112	114	45	106	17	71	44	17	97	112	73
48	82	45	13	13	107	106	56	103	22	55	118	52	17	87	61
49	97	119	96	75	109	116	20	113	49	68	102	36	59	72	36
50	78	36	102	58	92	106	92	56	96	59	96	50	32	43	83
51	66	102	115	12	70	44	79	19	85	86	22	93	32	39	78
52	22	56	64	107	69	41	72	71	26	57	48	14	15	63	33
53	67	104	30	30	44	65	117	71	30	89	54	97	79	114	73
54	97	89	55	114	25	99	27	90	50	95	22	26	98	52	93
55	93	56	47	64	89	84	98	40	38	32	76	80	78	70	110
56	30	43	56	117	55	61	119	53	70	10	15	112	25	55	49
57	87	73	90	72	34	60	65	42	75	35	113	69	105	98	53
58	100	39	87	102	112	70	36	112	100	77	118	98	120	45	69
59	40	82	86	20	92	87	110	83	82	100	25	68	27	16	84
60	58	42	13	68	118	116	66	110	79	18	68	57	87	31	84
61	63	90	77	77	45	15	87	106	59	42	33	43	115	16	69
62	31	22	97	55	29	12	107	41	11	28	16	31	74	20	104
63	28	32	92	104	39	82	101	14	102	31	57	116	14	40	107
64	96	31	58	109	96	67	62	97	66	88	41	73	69	46	76
65	21	55	14	115	72	12	59	84	22	73	114	70	10	60	106
66	27	25	16	81	91	108	81	25	58	28	53	14	104	22	46
67	110	73	32	46	51	64	50	71	95	17	56	22	55	68	63
68	75	53	30	109	17	85	87	73	32	34	81	118	114	99	114
69	39	110	94	16	106	111	45	28	67	47	58	55	114	55	60
70	118	81	45	68	16	101	28	65	52	40	78	71	16	81	119
71	110	81	65	70	34	112	22	107	29	24	41	120	11	98	91
72	75	103	77	73	45	48	47	76	13	32	31	63	99	35	38
73	79	84	69	87	43	21	46	31	110	45	75	23	40	64	22
74	66	63	46	110	25	14	56	106	63	28	26	69	17	63	91
75	72	84	94	77	66	68	110	70	41	74	76	33	37	31	66
76	0	30	71	46	112	49	102	73	101	68	73	117	48	118	93
77	30	0	50	42	58	70	29	114	37	115	109	66	107	88	78
78	71	50	0	106	117	50	87	113	83	40	104	74	83	105	98
79	46	42	106	0	56	52	84	51	14	76	79	42	114	72	12
80	112	58	117	56	0	15	59	59	37	88	95	62	90	19	52
81	49	70	50	52	15	0	39	112	43	100	80	35	68	15	99
82	102	29	87	84	59	39	0	33	63	103	58	27	85	48	16
83	73	114	113	51	59	112	33	0	119	67	117	29	81	61	68
84	101	37	83	14	37	43	63	119	0	28	64	58	79	58	47
85	68	115	40	76	88	100	103	67	28	0	86	84	35	110	67
86	73	109	104	79	95	80	58	117	64	86	0	31	64	94	80
87	117	66	74	42	62	35	27	29	58	84	31	0	41	28	36

<b>88</b>	48	107	83	114	90	68	85	81	79	35	64	41	0	49	82
<b>89</b>	118	88	105	72	19	15	48	61	58	110	94	28	49	0	90
<b>90</b>	93	78	98	12	52	99	16	68	47	67	80	36	82	90	0
<b>91</b>	42	83	42	62	72	12	74	69	77	80	120	47	23	45	119
<b>92</b>	10	43	27	27	109	100	13	16	114	91	105	10	55	32	39
<b>93</b>	85	41	56	51	33	23	73	63	103	29	47	53	36	59	41
<b>94</b>	62	118	67	64	31	32	23	89	43	119	12	12	85	75	76
<b>95</b>	90	79	103	46	45	103	23	94	89	53	113	74	70	34	96
<b>96</b>	39	67	22	76	59	107	79	69	43	25	21	54	47	120	89
<b>97</b>	102	112	32	86	77	102	69	99	23	109	24	40	34	84	65
<b>98</b>	108	35	58	54	79	78	106	12	78	83	28	54	70	13	86
<b>99</b>	110	52	50	104	80	80	58	83	80	57	100	24	82	109	91
<b>100</b>	25	35	107	14	25	110	97	95	109	31	90	101	94	116	76
<b>depósito</b>	81	42	93	94	93	79	24	33	44	119	54	38	55	32	46
<b>terminal</b>	50	41	70	12	75	20	47	64	14	11	91	106	21	76	60

<b>Clientes</b>	<b>91</b>	<b>92</b>	<b>93</b>	<b>94</b>	<b>95</b>	<b>96</b>	<b>97</b>	<b>98</b>	<b>99</b>	<b>100</b>	<b>Dep</b>	<b>Ter</b>
<b>1</b>	79	81	24	83	38	87	118	77	33	56	97	75
<b>2</b>	39	37	83	69	45	26	81	83	61	93	66	95
<b>3</b>	75	79	14	78	75	75	12	101	49	89	109	24
<b>4</b>	17	56	103	93	62	56	97	26	75	65	119	69
<b>5</b>	117	75	11	58	36	27	103	114	20	78	55	67
<b>6</b>	68	119	24	78	104	19	110	105	117	112	38	85
<b>7</b>	102	37	78	27	79	101	36	75	116	32	55	116
<b>8</b>	86	67	74	46	54	30	38	117	12	119	29	120
<b>9</b>	18	52	80	86	47	106	14	68	92	12	41	76
<b>10</b>	70	120	49	120	44	28	41	67	75	17	76	55
<b>11</b>	37	39	13	44	46	19	82	101	25	92	86	88
<b>12</b>	79	75	16	52	17	68	97	49	45	115	37	76
<b>13</b>	28	91	93	111	68	16	90	50	59	30	80	108
<b>14</b>	15	92	68	74	58	17	105	77	50	105	35	48
<b>15</b>	26	39	58	70	87	66	91	102	106	78	66	101
<b>16</b>	114	110	102	53	101	15	28	80	50	82	34	29
<b>17</b>	102	31	118	68	84	29	111	86	50	29	114	25
<b>18</b>	54	82	79	61	116	62	53	46	80	87	110	21
<b>19</b>	37	45	19	45	20	118	117	78	90	72	50	108
<b>20</b>	82	78	15	61	107	109	89	54	72	88	23	115
<b>21</b>	76	16	109	95	35	47	61	69	62	19	94	37
<b>22</b>	65	34	103	117	30	60	21	32	73	65	58	115
<b>23</b>	33	16	26	75	70	12	85	77	96	80	21	16
<b>24</b>	57	88	73	97	70	89	27	63	100	28	114	18
<b>25</b>	12	86	86	16	84	45	13	107	38	54	115	68
<b>26</b>	117	12	77	97	49	94	88	57	61	110	96	80
<b>27</b>	97	101	80	75	91	54	65	17	115	93	18	48

28	109	71	27	65	32	28	65	99	80	106	75	102
29	10	103	118	82	10	76	91	28	75	52	42	35
30	48	11	47	101	108	67	70	70	97	105	104	50
31	68	90	33	33	49	99	103	59	13	55	115	41
32	77	108	81	118	30	31	113	107	20	90	44	96
33	113	11	78	50	20	108	45	100	118	75	59	10
34	39	69	119	86	110	85	79	44	82	31	75	18
35	72	44	104	88	101	72	106	114	111	51	119	42
36	78	59	51	43	43	79	111	63	97	68	43	51
37	27	16	55	23	78	78	22	102	37	12	23	100
38	16	100	65	110	67	107	83	114	108	112	39	32
39	64	74	93	115	32	56	100	87	48	36	31	109
40	74	75	57	100	116	64	99	65	112	62	100	120
41	33	32	16	56	90	16	101	48	37	119	26	51
42	102	86	31	93	111	68	63	73	66	105	95	114
43	30	54	105	91	49	84	61	44	98	118	83	101
44	101	31	12	63	61	13	29	38	30	104	98	63
45	116	116	53	26	14	117	46	64	87	13	109	55
46	74	79	50	47	71	107	104	57	106	23	116	50
47	11	115	26	34	97	112	38	71	72	88	43	58
48	91	15	94	118	84	22	47	39	61	64	100	88
49	82	108	51	54	13	26	76	100	76	72	106	104
50	100	71	118	17	10	37	107	92	76	114	119	88
51	48	44	41	85	20	89	97	113	111	28	12	89
52	111	69	111	81	79	44	10	32	31	80	81	67
53	39	104	111	35	33	25	47	103	86	104	111	26
54	55	12	117	108	60	73	47	27	111	57	59	96
55	48	117	29	59	12	81	46	93	77	62	54	39
56	108	92	111	37	69	56	70	27	23	115	96	89
57	118	46	31	22	80	95	18	94	97	81	39	118
58	52	63	119	53	24	37	48	76	51	51	95	55
59	120	63	58	60	40	42	59	51	80	46	70	39
60	56	42	52	53	97	120	72	113	63	38	12	14
61	81	114	101	118	15	13	91	17	77	88	59	62
62	81	83	25	33	32	55	81	17	82	64	80	94
63	112	88	99	18	76	55	16	49	54	33	98	99
64	20	113	99	54	68	106	100	75	44	86	83	73
65	26	90	76	10	39	26	87	48	31	115	39	43
66	17	60	55	100	44	112	11	35	118	36	92	119
67	120	44	77	120	17	81	120	101	54	34	119	21
68	91	120	114	117	45	68	79	76	103	61	91	81
69	38	73	68	82	76	105	88	77	12	119	110	50
70	52	105	93	86	88	98	100	60	73	102	90	107
71	12	67	24	49	83	36	14	32	51	95	62	86
72	20	81	31	24	93	89	90	70	103	75	85	50

73	39	88	26	110	109	63	115	48	92	89	41	29
74	49	84	19	93	110	92	64	50	10	61	44	93
75	117	16	57	74	97	118	22	26	23	42	65	80
76	42	10	85	62	90	39	102	108	110	25	81	50
77	83	43	41	118	79	67	112	35	52	35	42	41
78	42	27	56	67	103	22	32	58	50	107	93	70
79	62	27	51	64	46	76	86	54	104	14	94	12
80	72	109	33	31	45	59	77	79	80	25	93	75
81	12	100	23	32	103	107	102	78	80	110	79	20
82	74	13	73	23	23	79	69	106	58	97	24	47
83	69	16	63	89	94	69	99	12	83	95	33	64
84	77	114	103	43	89	43	23	78	80	109	44	14
85	80	91	29	119	53	25	109	83	57	31	119	11
86	120	105	47	12	113	21	24	28	100	90	54	91
87	47	10	53	12	74	54	40	54	24	101	38	106
88	23	55	36	85	70	47	34	70	82	94	55	21
89	45	32	59	75	34	120	84	13	109	116	32	76
90	119	39	41	76	96	89	65	86	91	76	46	60
91	0	47	94	21	94	71	35	76	41	59	76	39
92	47	0	32	104	36	15	12	68	32	38	17	27
93	94	32	0	69	44	67	107	19	94	84	97	115
94	21	104	69	0	76	116	58	29	102	115	53	84
95	94	36	44	76	0	109	17	61	105	40	71	97
96	71	15	67	116	109	0	115	61	13	76	61	11
97	35	12	107	58	17	115	0	93	110	108	42	101
98	76	68	19	29	61	61	93	0	83	110	109	70
99	41	32	94	102	105	13	110	83	0	36	70	33
100	59	38	84	115	40	76	108	110	36	0	53	108
depósito	76	17	97	53	71	61	42	109	70	53	0	112
terminal	39	27	115	84	97	11	101	70	33	108	112	0

Tabla 55: Peso en toneladas de los contenedores de las órdenes asignadas

CLIENTES	PEDIDOS					
	$O_{IF2}$	$O_{IF4}$	$O_{IE2}$	$O_{IE4}$	$O_{OF2}$	$O_{OF4}$
1	17	21	0	25	15	0
2	0	0	0	20	17	0
3	0	25	11	20	15	22
4	0	0	0	21	12	0
5	16	0	0	26	0	0
6	15	21	0	24	12	0
7	11	25	0	21	13	20
8	0	24	0	0	0	0
9	16	0	11	0	10	23



10	11	0	0	0	0	0
11	16	0	18	0	10	25
12	0	26	14	26	13	22
13	11	26	0	23	0	22
14	0	23	14	20	15	22
15	0	0	14	21	15	0
16	15	20	0	0	0	0
17	0	0	16	22	16	0
18	0	26	17	23	11	0
19	0	0	0	20	13	23
20	11	0	18	26	13	23
21	0	0	12	23	16	21
22	17	0	13	26	0	21
23	14	21	11	24	0	22
24	13	26	0	0	11	0
25	14	0	14	0	0	0
26	11	0	0	0	0	21
27	0	0	17	26	15	26
28	0	21	0	0	0	22
29	10	0	16	20	10	0
30	11	20	0	20	17	0
31	0	22	0	25	0	20
32	0	21	0	0	17	0
33	0	0	15	0	11	0
34	14	0	18	0	13	0
35	0	0	14	0	18	0
36	11	0	15	26	11	0
37	0	0	14	21	0	0
38	13	0	0	0	0	25
39	11	25	11	25	0	0
40	15	20	15	0	14	21
41	0	26	0	0	0	0
42	17	0	11	21	10	23
43	16	22	0	23	0	0
44	0	0	0	0	0	0
45	11	0	0	21	0	0
46	0	22	17	21	13	21
47	0	24	15	20	0	0
48	10	0	0	24	0	20
49	18	0	0	0	0	0
50	11	22	12	0	0	21
51	13	23	0	0	0	20
52	16	20	12	0	0	0
53	15	0	0	0	0	23
54	0	20	0	0	17	0

55	10	0	0	0	0	24
56	0	20	0	20	12	20
57	11	0	18	0	13	0
58	13	20	0	25	0	0
59	13	0	14	0	17	25
60	17	0	15	22	0	25
61	0	20	0	24	0	26
62	0	0	0	24	16	26
63	14	24	0	24	11	0
64	15	0	0	0	17	0
65	0	0	0	22	0	21
66	12	0	0	0	0	0
67	10	0	13	0	0	0
68	0	26	18	24	0	23
69	0	0	13	0	16	22
70	0	0	12	0	0	0
71	14	0	0	24	0	26
72	0	0	0	0	16	0
73	0	26	0	0	13	22
74	0	0	0	0	0	23
75	0	0	18	0	12	22
76	0	0	12	25	15	0
77	17	25	0	0	12	0
78	0	0	0	0	16	24
79	17	26	13	0	18	22
80	17	0	0	0	0	0
81	15	21	13	26	0	20
82	17	20	17	0	16	22
83	15	0	0	0	0	24
84	0	0	0	0	17	0
85	18	0	12	0	0	22
86	15	24	16	26	0	20
87	17	0	18	0	14	0
88	14	22	17	23	0	22
89	0	0	15	25	0	0
90	16	0	0	0	0	20
91	15	22	11	0	0	0
92	11	23	0	21	0	0
93	0	0	0	25	0	0
94	10	21	13	0	16	0
95	12	0	0	20	0	26
96	0	26	15	0	0	0
97	11	0	0	20	0	21
98	12	0	0	0	12	0
99	0	26	0	0	15	0

<b>100</b>	0	0	11	26	18	22
------------	---	---	----	----	----	----