

TRABAJO FIN DE MÁSTER
2010 - 2011

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

***OPTIMIZACION DE OPERACIONES DE
TRANSPORTE A TRAVES DEL USO DEL
TRANSPORTE INTERMODAL***



Centro Politécnico Superior



Universidad de Zaragoza



EUITIZ

Autor

Dª. Leticia Madoz Balaguer

Director

Dr. D. Emilio Larrodé Pellicer

Diciembre 2010

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

OPTIMIZACION DE OPERACIONES DE TRANSPORTE A TRAVES DEL USO DEL TRANSPORTE INTERMODAL

Resumen

El tema del presente Trabajo de Fin de Master es la intermodalidad en el transporte de mercancías, justificado por el auge del transporte sostenible en la sociedad actual.

La congestión en las carreteras por el abuso de este modo de transporte, obliga a buscar maneras de desviar parte de esa mercancía a otros modos de transporte, buscando que éstos sean además medioambientalmente más sostenibles, principalmente el barco y el ferrocarril, si bien la intermodalidad incluye también el modo aéreo.

Se pretende pues en el Trabajo de fin de Master realizar una metodología para la elección de la mejor ruta en el transporte de mercancías entre dos puntos determinados. Lo novedoso viene dado por el uso en esta ruta de la intermodalidad, teniendo en cuenta los costes que supone la intermodalidad en el transporte de mercancías.

Para ello, en primer lugar se expone un análisis y descripción de la intermodalidad, así como de todos los posibles intercambios modales y sus principales características.

A continuación se exponen los factores que la condicionan, es decir, los factores relevantes en el transporte intermodal de mercancías, que determinan su efectividad.

Y por último se desarrolla una metodología para el proceso de elección de la mejor ruta entre dos puntos, teniendo en cuenta los nodos intermodales intermedios a estos dos puntos. Se plantea el problema, con su función objetivo y sus restricciones, que posteriormente son formuladas, sirviendo como paso previo de una futura tesis doctoral que modelice el cálculo de ese coste intermodal en cada nodo para cada modo de transporte y que resuelva mediante métodos metaheurísticos el problema aquí planteado.

Índice memoria principal

Índice memoria principal	1
1. Introducción, justificación y alcance del Trabajo	3
2. Intercambios modales en el transporte de mercancías.....	5
2.1 Tipos de intercambios modales	6
2.2 Zona de carga de estación intermodal de ferrocarril.....	7
2.3 Terminal portuaria	13
2.4 Zona de carga aeroportuaria.....	16
3. Factores relevantes en intermodalidad	19
4. Planteamiento del problema de decisión de ruta.....	23
5. Formulación del problema	26
6. Conclusiones	32

1.

Introducción, justificación y alcance del Trabajo

La situación actual en el mundo del transporte está marcada por dos problemas principales que afectan a la sociedad en general.

El primero de ellos es la congestión de las carreteras, debido al excesivo nivel de tráfico tanto a nivel de pasajeros como de mercancías.

Hoy en día, el tráfico de mercancías está dominado por la carretera. La razón principal es el hecho de poder transportar las mercancías de puerta a puerta (origen/destino), es el único medio de transporte que lo permite en cualquier caso, ya que tanto el ferroviario como el aéreo o el marítimo, necesitan el transporte de la llamada *última milla*, que precisa de un camión que lleve la mercancía desde el apartadero, puerto o aeropuerto respectivamente al destino final.

El segundo problema es la contaminación generada por el transporte por carretera debido al CO₂ emitido por los camiones, multiplicado por el gran número de camiones que circulan cada día por las carreteras.

La comisión europea adoptó, en septiembre de 2001, un nuevo Libro Blanco sobre el transporte, bajo el título “La política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad”, donde recogía las propuestas legislativas e iniciativas que prevé aportar para desarrollar la política común de transportes durante el periodo 2000-2010.

Los tres mensajes principales que aporta son:

1. Es necesario un equilibrio de los diferentes modos de transporte para garantizar la movilidad en una Europa ampliada.
2. Es necesario luchar contra la congestión y los efectos medioambientales.
3. Es necesario reorientar la política de transportes hacia los ciudadanos, que exigen más seguridad, más calidad y más protección en sus desplazamientos.

Es por ello que desde los organismos políticos se está fomentando la intermodalidad como solución a los dos problemas anteriormente mencionados. Por

un lado contribuye a descongestionar las carreteras al desviar parte de la mercancía por otros modos o medios de transporte y por otro, por este mismo motivo disminuye la emisión de gases nocivos a la atmósfera, promoviendo el uso de los modos ferroviario y marítimo, ambos mucho más medioambientalmente sostenibles que la carretera.

En este trabajo se pretende realizar un paso previo a una tesis doctoral que versará sobre la elección de la mejor ruta entre dos puntos teniendo en cuenta la intermodalidad, y dándole un peso específico a la misma a la hora de tomar decisiones. A lo largo del trabajo se definirán los distintos modos y medios de transporte, así como las opciones de intermodalidad entre ellos. Así mismo, en la segunda parte del trabajo se realizará un estudio de los distintos factores influyentes en cada uno de los modos de transporte, así como de su influencia dentro del proceso intermodal. Por último, y como punto fuerte del trabajo, se expondrá una metodología para la elección de la mejor ruta para transportar mercancía entre dos puntos conocidos (origen y destino), con la particularidad de que las rutas calculadas son intermodales. Se propone como objetivo conseguir el mínimo coste en la ruta, no solo teniendo en cuenta el coste de la propia ruta sino también, y es este el punto novedoso, se tiene en cuenta el coste de nodo intermodal, es decir, el coste que supone cambiar de modo de transporte en un determinado nodo intermodal (puerto, aeropuerto o estación de ferrocarril). Durante este intercambio de modo, la mercancía no está recorriendo kilómetros, es un tiempo y un coste adicional al de la propia ruta. Este coste se modelizará para cada modo de transporte en la futura tesis. El alcance del presente Trabajo de Fin de Master es plantear y formular formalmente el problema, que posteriormente será modelizado y resuelto en la tesis antes mencionada.

2.

Intercambios modales en el transporte de mercancías

En primer lugar, es necesario definir la palabra intermodalidad, ya que en ella nos vamos a basar en el resto de la memoria.

Según el informe del Ministerio de Fomento “Lenguaje del transporte intermodal”:

“Transporte intermodal designa el movimiento de mercancías en una misma unidad o vehículo usando sucesivamente dos o más medios de transporte sin manipular la mercancía en los intercambios de modo.”

Por extensión, el término intermodalidad, se ha usado para describir un sistema de transporte en el que dos o más modos de transporte intervienen en el transporte de un envío de mercancías de forma integrada, sin procesos de carga y descarga, en una cadena de transporte puerta a puerta.”

A continuación se exponen una serie de definiciones de conceptos similares a la intermodalidad:

- ✓ **Transporte Multimodal:** Designa el movimiento de mercancías usando dos o más modos de transporte, entre lugares distintos.
- ✓ **Transporte Intermodal:** Es un tipo de transporte multimodal, que designa el movimiento de mercancías en una misma unidad o vehículo utilizando sucesivamente dos o más modos de transporte sin manipular la mercancía en los intercambios de modo.
- ✓ **Transporte Combinado:** Es el transporte intermodal de mercancías en el cual los recorridos principales se realizan habitualmente en tren, vía navegable o travesía

marítima y con el mínimo recorrido posible por carretera, exclusivamente en la etapa inicial y/o la final.

- ✓ **Ferroulage:** Es el transporte que combina los modos de ferrocarril y carretera.

En segundo lugar, se explicarán cuales son los modos de transporte existente, realizando una breve descripción de cada uno de los mismos, para finalmente plantear los diferentes casos de intermodalidad o combinación entre modos que pueden existir y explicar dichos procesos.

Los modos de transporte de mercancías que podemos encontrar son cuatro:

- ✓ Carretera
- ✓ Ferroviario
- ✓ Aéreo
- ✓ Por vías navegables (marítimo y fluvial)

En el Anexo I de este documento se realiza una descripción de cada uno de estos modos de transporte con sus principales características para el transporte de mercancías.

2.1 *Tipos de intercambios modales*

Dentro del transporte intermodal, existen diversos intercambios posibles de la mercancía entre modos de transporte. Dichos intercambios son los siguientes:

- Intercambio carretera – ferrocarril
- Intercambio carretera – marítimo
- Intercambio carretera - aéreo
- Intercambio ferrocarril – marítimo

Los casos de intermodalidad entre el modo aéreo y el marítimo, así como entre los modos ferroviario y aéreo, no se estudian en este trabajo, puesto que se trata casos muy excepcionales, que precisan una infraestructura muy concreta y complicada que permitiera un intercambio directo de la mercancía entre avión y barco, y ferrocarril y barco respectivamente, y tienen lugar rara vez.

Antes de pasar a describir los distintos procesos de intercambio, se ha de explicar qué es la UTI (unidad de transporte intermodal).

La UTI es el contenedor, caja móvil o semirremolque adecuado para el transporte intermodal.

Actualmente, la UE está trabajando para normalizar una unidad de carga intermodal óptima, la UECI (Unidad Europea de Carga Intermodal), que combine las ventajas de los contenedores (resistencia y posibilidad de apilarlos) y las de las cajas móviles, en especial su mayor capacidad. A fin de cumplir las condiciones necesarias para garantizar la máxima intermodalidad, la UECI ha de poder apilarse, manipularse por la parte superior y soportar un trayecto marítimo. Debe ofrecer el mayor espacio posible para el transporte de pallets ISO y facilitar una carga y una descarga rápidas

para así reducir gastos y evitar pérdidas de tiempo. Puede consistir en una caja polivalente para mercancías secas que permita la carga frontal de dos paletas.

Las UECI han de poder utilizarse en carretera y han de atenerse, por tanto, a las disposiciones de la Directiva 96/53/CE.

Para poder efectuar las operaciones de cambio de modo usando estos contenedores son precisos los elementos siguientes:

- Bastidor de anclaje (English: spreader; Français: cadre de préhension) que es una estructura extensible que permite agarrar la parte superior de las esquinas de las UTI.
- Elementos angulares (English: corner fitting; Français: pièce de codín) que son puntos fijos habitualmente situados en las partes superior e inferior de las esquinas del contenedor en las que se sitúan los dispositivos de enganche para que el contenedor pueda ser elevado, apilado o asegurado. Cuando se utilizan en las cajas móviles, se ubican en puntos compatibles con los elementos angulares de los contenedores de 20 y 40 pies.
- Pestillo giratorio de anclaje (English: twistlock; Français: verrou tournant), que es un dispositivo estándar que penetra en los elementos angulares de las UTI y queda bloqueado después de girar. De esta forma se garantiza su desplazamiento seguro. Se utiliza también para fijar UTI en vehículos y buques.

A continuación, se realiza el estudio de cada uno de estos intercambios, analizando para ello el lugar en el que se produce el propio intercambio de la mercancía entre ambos modos, hay tres posibles lugares donde pueden realizarse intercambios modales de mercancía.

- Zona de carga de estación intermodal de ferrocarril: En ella se realiza el intercambio entre los modos ferroviario y carretero.
- Zona de carga de puerto marítimo: En ella se realizan dos de los tipos de intercambio mencionados, el intercambio carretera-marítimo y ferroviario-marítimo, ya que la carga ha de ser llevada hasta el puerto o recogida en el mismo para poder hacer uso del modo marítimo.
- Zona de carga de aeropuerto: En ella se realiza el intercambio entre modo carretera y modo aéreo.

2.2 *Zona de carga de estación intermodal de ferrocarril*

En ella se realiza, como se ha explicado anteriormente, el intercambio entre los modos carretera y ferrocarril.

Existen dos tipos de intercambio de mercancías entre tren y camión, recibiendo ambas la denominación de transporte combinado (es un caso particular de transporte intermodal en el que se hace el uso mínimo posible del modo carretera).

El transporte combinado se divide en dos modalidades:

➤ Transporte combinado acompañado

Es el transporte de un vehículo de carretera entero, acompañado por el conductor, mediante otro modo de transporte. Es decir, el camión o vehículo de carretera cargado es transportado en ferrocarril mediante vagones especiales.

Estos vagones, son llamados “de plataforma rebajada” para facilitar la carga de las UTI.

Existen tres modalidades de vagones para este tipo de intercambio acompañado:

- ❖ Vagón para carretera rodante
- ❖ Vagón auto cargante
- ❖ Vagón esqueleto/bastidor/gusana

❖ Vagón para carretera rodante

Se trata de un vagón de suelo rebajado en toda su longitud que, juntamente con otros vagones del mismo tipo, forma una carretera rodante. Se denomina vagón para carretera rodante (Figura 1)



Ilustración 12: Vagón para carretera rodante. Fuente: Us railroad pix.



Ilustración 13: Vagón para carretera rodante cargado.



Figura 1. Vagón para carretera rodante

La carretera rodante es una tecnología, de origen suizo, para transporte de camiones enteros y de vehículos articulados, utilizando vagones con ruedas de diámetro reducido (transporte combinado carretera/ferrocarril acompañado). El embarque de los camiones es longitudinal, por una extremidad del tren, uno tras otro (ver Figura 2).



Figura 2. Embarque de camiones para carretera rodante

❖ Vagón auto cargante

Es un vagón de tren con una subestructura desmontable, con dispositivos para la manipulación vertical, permitiendo así la carga y descarga de semirremolques y vehículos terrestres.

❖ Vagón esqueleto/bastidor/gusana

Este tipo de vagón surge ante la necesidad de crear un vagón con el que se puedan transportar remolques semitractores estándares europeos y contenedores (Figura 3).



Figura 3. Vagón esqueleto

El otro tipo de transporte combinado es el llamado no acompañado. En este caso la cabeza tractora del vehículo terrestre no acompaña a la UTI durante el transporte.

➤ Transporte combinado no acompañado

Existen cuatro modalidades de vagón para este tipo de transporte.

- ❖ Vagón hueco para semirremolque
- ❖ Bogie dimodal o semirremolque bimodal
- ❖ Sistema modalohr
- ❖ Sistema CargoSpeed

❖ Vagón hueco para semirremolque

Las características operativas de este método son:

- ✓ Con la ayuda de una grúa pórtico o carretilla elevadora dotada de un accesorio de pinzas, se eleva el semirremolque para depositarlo sobre la cuna del vagón o sobre el pavimento, según sea una operación de carga o descarga.
- ✓ Las pinzas ejercen presión sobre un par de placas metálicas situadas en los laterales de la caja del semirremolque de aproximadamente 50 cm de longitud.
- ✓ Los vagones están acondicionados para el transporte de contenedores de 20, 30 y 40 pies así como cajas móviles y semirremolques.
- ✓ El vagón dispone de un piso rebajado sobre el que apoyan las ruedas de los ejes del semirremolque. Este piso esta subdividido en dos zonas (o cunas) separadas por calzos que impiden el desplazamiento de las ruedas.
- ✓ El vagón dispone de un mecanismo de apoyo y sujeción del semirremolque a este, de similares características al enganche de un semirremolque a la cabeza tractora (5^a rueda). De esta forma, la parte delantera del semirremolque queda totalmente inmovilizado dentro del vagón.

A continuación, se muestran imágenes de vagones huecos para semirremolques (Figura 4)

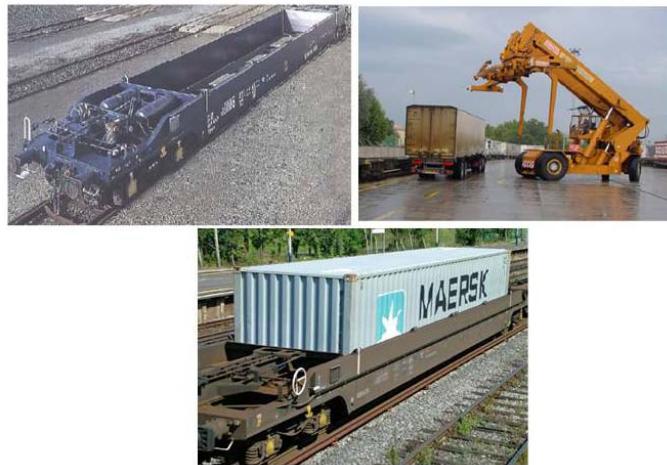


Figura 4. Vagón hueco para semirremolque

❖ **Bogie bimodal o semirremolque bimodal**

Se trata de semirremolques de carretera que incorpora un elemento de apoyo sobre el bogie ferroviario y mecanismos para la elevación y retracción de la suspensión neumática, posibilitando así su circulación sobre vías de ferrocarril; y un elemento de conexión con semirremolques contiguos, de manera que se puedan formar trenes.

Sus principales ventajas son:

- ✓ El bogie bimodal, con pequeñas modificaciones (elemento de apoyo de los semirremolques, equipo de freno y enclavamientos mecánicos), permite la circulación ferroviaria y la tracción, sin necesidad de estructura de vagón. Las técnicas bimodales ofrecen soluciones de transporte combinado más competitivas, por simplicidad operativa y ahorro de coste de operación.
- ✓ No precisan la actuación de grúas para el intercambio modal, puesto que éste se realiza de forma horizontal, sin elevar la caja contenedora, mediante el acoplamiento horizontal de un semirremolque de carretera y el elemento ferroviario. Para formar o fraccionar un tren, sólo es preciso la actuación de una cabeza tractora de carretera, que además puede ser una de las utilizadas para los acarreos finales.
- ✓ Mayor capacidad de transporte de carga por tren, debido a la menor tara (al necesitar solamente un bogie por semirremolque), y al mayor número de unidades por tren.
- ✓ La disminución del tamaño de las terminales hace posible la viabilidad de un mayor número de ubicaciones potenciales, con lo que la situación estratégica, vinculada a la facilidad de acceso y conexión con los centros logísticos integrales, puede lograrse más fácilmente.
- ✓ Las facilidades operativas disminuyen el tiempo de formación del tren, y por tanto el coste operativo del intercambio modal, lo que incide en la mejora de los plazos de transporte.

❖ Sistema Modalohr

Es el sistema creado por la empresa Lohr para poder realizar el intercambio modal no acompañado ferrocarril-carretera. A continuación, se expone un esquema del proceso de carga (Figura 5)



Figura 5. Sistema Modalohr

La carga horizontal de los camiones se efectúa directamente con la cabeza tractora (no es necesario ningún equipo para la manipulación de la carga).

La carga lateral en batería de los camiones permite un trasbordo simultáneo y muy rápido de los mismos.

Tiene un sistema de articulación y de apertura de los vagones sencillo totalmente mecánico, el mantenimiento del mismo es reducido. Por el contrario, requiere de un sistema hidráulico de bastante complejidad.

Se requiere de una terminal de trasbordo, simplemente asfaltada a un lado y otro de una vía ferroviaria (no es necesario ningún andén), equipada con sistemas de apertura de puesto fijo instalados directamente sobre la vía. Esta terminal no necesita ningún material en concreto o especial.

Los costes de mantenimiento del vagón, se pueden comparar a los de un vagón clásico debido al uso de bogie y ruedas estándares.

❖ Sistema CargoSpeed

Se trata de un sistema similar al Modalohr, salvo por pequeñas diferencias a la hora de realizar la operación de elevación del vagón.

En el sistema Cargospeed el conjunto de los vagones están anclados de forma permanente y es la base del vagón la que mediante el pistón hidráulico se eleva para poder realizar la operación de carga o descarga del semirremolque.

2.3 *Terminal portuaria*

Un puerto es una infraestructura puntual cuya principal función es transferir mercancías y/o pasajeros entre dos modos de transporte: el marítimo y el terrestre.

En el puerto se llevan a cabo, en términos de carga de mercancía, servicios tanto para el barco como para la carga transportada. Dichos servicios pueden clasificarse en tres grandes categorías:

- ✓ Servicios relacionados con el mar: Engloba todos los servicios necesarios para acceder al puerto y, en su caso atracar, como por ejemplo, ayudas a la navegación, practicaje, remolque y amarre.
- ✓ Servicios relacionados con tierra: Comprende todos los servicios que puede precisar el barco o su mercancía desde el lado de tierra, como por ejemplo: la manipulación de la mercancía por parte de los trabajadores portuarios, el servicio prestado por las grúas del puerto, otros equipos o vehículos, y el almacenaje.
- ✓ Servicios relacionados con la distribución, como por ejemplo, la manipulación de la mercancía en la terminal de carga de contenedores y el transporte dentro del puerto.

Respecto a la manipulación de la mercancía, existen una serie de conceptos propios del modo marítimo, que se exponen a continuación:

- Estiba: Manipulación de la mercancía que se efectúa desde que está suspendida en el costado del buque, hasta que es depositada en la bodega del mismo.
- Desestiba: Manipulación de la mercancía que se efectúa desde la bodega del buque hasta que ésta queda suspendida en el costado de buque.
- Carga: Desplazamiento de la mercancía desde la explanada o tinglado hasta que queda suspendida al costado del buque.
- Descarga: Desplazamiento de la mercancía desde que la misma está suspendida en el costado del buque hasta que queda situada en la explanada o tinglado.
- Trasbordo: Trasferencia directa de mercancías de un buque a otro.
- Recepción: Depósito de la mercancía en el recinto portuario, como paso previo a su embarque.

- Entrega: Identificación y entrega de la mercancía a los medios de transporte terrestre que se encargan de sacarla del recinto portuario.

Actualmente, la tendencia en el transporte marítimo de mercancías es la llamada “unificación”. La unificación de la mercancía supone el empaquetamiento de varios artículos de carga de pequeño tamaño en una unidad de tamaño estándar que pueda ser manejada por máquinas específicamente diseñadas. Ello tiene el efecto de reducir la mano de obra necesaria y acelerar la manipulación de los bienes.

Estas unidades estándar incluyen bienes atados en pallets que son manejados por carretillas elevadoras; planchas manipuladas por tractores; cargas rodantes (camiones roll-on/roll-off y trailers); contenedores estándar (ISO); e incluso el uso de barcazas que pueden ser izadas al barco matriz. Entre los diferentes métodos desarrollados (roll-on roll-off, pallets, etc.) destaca la contenerización, que consiste en empaquetar la carga en cajas de tamaño estándar tan al inicio de la cadena de transporte como sea posible. Las cajas de tamaño estándar pueden ser fácilmente transferibles entre modos de transporte sin que la mercancía del interior sufra ningún tipo de percance.

En cuanto al proceso de carga/descarga en este modo de transporte, dependerá principalmente del tipo de carga transportada, que puede ser de cuatro tipos:

- Mercancía general fraccionada
- Mercancía general conteneirizada
- Mercancía general rodante

➤ Mercancía general fraccionada

Se llama así a la mercancía “no unificada”, y su proceso de carga/descarga consiste en:

- La operación de bodega: Es la operación de estiba/desestiba de la mercancía en la bodega del barco hasta que ésta está perfectamente colocada para partir en el caso de la carga, o para alimentar el gancho de la grúa en el caso de la descarga.
- La operación de enganche: Consiste en el izado de la carga desde pie de muelle hasta la bodega del buque en el caso de la carga, o a la inversa en el caso de la descarga.
- La operación de muelle: Consiste en el traslado de la carga hasta el costado del buque en el muelle en el caso de la carga, o lejos del muelle hasta su lugar temporal de depósito dentro de la terminal en el caso de la descarga.

- La operación de recepción/entrega: Consiste en la recepción en la terminal de la mercancía para ser cargada en el barco; o la entrega de la mercancía para ser retirada de la terminal.

➤ **Mercancía general conteneirizada**

Los cuatro sistemas de manipulación de contenedores que más corrientemente se utilizan hoy en día son:

- El sistema de almacenamiento en remolques: Los contenedores descargados del barco por medio de una grúa se colocan en un remolque de carretera, que se lleva hasta el lugar que se le ha asignado en la zona de almacenamiento, donde permanece hasta que viene a recogerlo el tractor de carretera. La operación de carga es similar pero a la inversa. Como estos contenedores no pueden apilarse, este sistema requiere una amplia zona de almacenamiento en tránsito.
- El sistema de carretillas de horquilla elevadora: Los contenedores son descargados del barco por medio de una grúa, y recogidos al pie de ésta por una carretilla de horquilla elevadora de gran potencia, que lo traslada a la zona de almacenamiento, donde son apilados en dos o tres alturas cuando se trata de contenedores llenos, o en cuatro o cinco cuando se trata de contenedores vacíos.
Con este sistema, también se pueden utilizar tractores con remolque para trasladar los contenedores desde el costado del buque hasta la zona de apilamiento, lo que reduciría el número de carretillas elevadoras necesarias. La anchura típica de los pasillos de la zona de apilamiento es de dieciocho metros para los contenedores de cuarenta pies, y de doce metros para las unidades de veinte pies. Con este sistema las necesidades de espacio son menores, si bien es necesario un reforzamiento suficiente del suelo y del afirmado.
- Sistema de carretillas pórtico. Las carretillas pórtico pueden apilar los contenedores en dos o tres alturas y moverlos entre la grúa de muelle y la zona de almacenamiento y cargarlos o descargarlos de los vehículos de carretera.
- Sistema de grúas-pórtico: En este sistema los contenedores se apilan en la zona de almacenamiento por medio de grúas-pórtico montadas sobre raíles o sobre neumáticos. Las grúas sobre raíles pueden apilar los contenedores hasta en cinco alturas (aunque normalmente no se apilan en más de cuatro). Las grúas-pórtico montadas sobre neumáticos pueden apilar normalmente los contenedores en dos o tres alturas. La traslación entre el muelle y la zona de almacenamiento se hace por medio de unidades tractor-remolque. Este sistema reduce

considerablemente las necesidades de espacio, ya que permite hacer pilas altas.

En la práctica se observan también sistemas mixtos que son mezcla de los anteriormente expuestos.

➤ **Mercancía general rodante**

En este caso, la operación de carga/descarga se simplifica aún más debido a que no es necesario utilizar la grúa para introducir/extrair la mercancía del buque, sino que ésta entra o sale del mismo horizontalmente, de modo que la operación queda reducida a la operación de muelle y la operación de recepción/entrega. Sin embargo, en muchas ocasiones la mercancía llega a la terminal para ser cargada sin espera, o es descargada y acto seguido abandona la terminal por lo que también desaparecería en estos casos la operación de recepción/entrega.

Dentro del tipo de carga que puede ser manipulada por rodadura o por transporte se distinguen dos grupos.

En el primer grupo se incluyen:

- a) Contenedores sobre semirremolques o chasis, con o sin tractor.
- b) Cargas similares a contenedores sobre remolques o semirremolques de carretera, con o sin tractor.
- c) Carga sobre ruedas. Se trata de camiones, turismos, autobuses, etc., que constituyen por si mismos el cargamento.

En el segundo grupo se incluyen:

- a) Otras unidades de carga como, por ejemplo, la madera embalada.
- b) Contenedores transportados y colocados en su lugar por grandes carretillas elevadoras.

2.4 Zona de carga aeroportuaria

El transporte aéreo de mercancías es un modo especialmente complicado debido principalmente a su elevado coste y a la gran cantidad de agentes distintos que intervienen en el proceso de transporte desde el punto de origen al punto de destino, así como a la gran cantidad de operaciones de manipulación de la carga que tienen lugar en el mismo proceso.

A continuación se muestra un esquema del proceso completo (Figura 6)

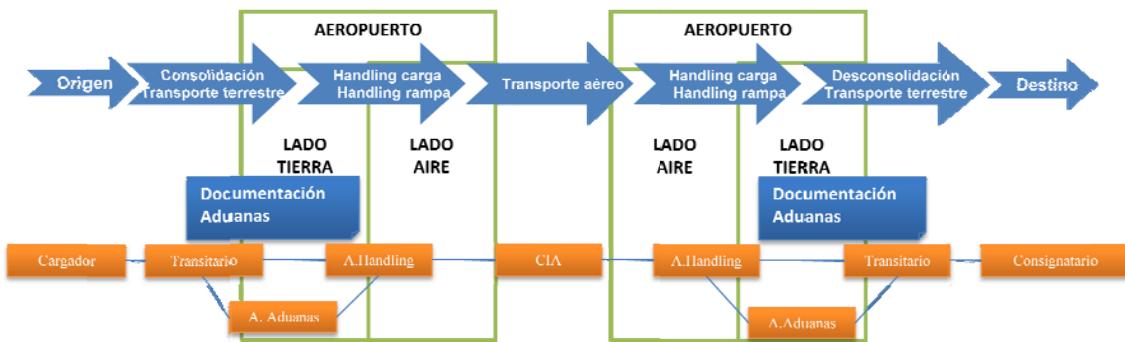


Figura 6. Transporte aéreo de mercancías

Como se observa en el esquema anterior, desde el origen hasta el destino de la mercancía, existen gran cantidad de agentes intervinientes y operaciones de manipulación de la mercancía.

Los agentes intervinientes en dicho proceso son los siguientes:

- Agente de aduanas, es el encargado de realizar los trámites del despacho aduanero de la mercancía en importación, exportación y tránsito.
- Los transitarios, son agentes cuya función es la gestión de los servicios de transporte, combinando el modo aéreo y de carretera.
- El integrador, es el agente que abarca todos los segmentos del transporte, más comúnmente conocido como sistema puerta a puerta.
- El agente handling, es el encargado del servicio de asistencia en tierra a la carga. Existen dos tipos de agente handling, el de rampa y el de carga.
- La compañía aérea, está condicionada por el origen, destino y la estacionalidad. El tamaño de la flota y la capacidad del avión son factores que contribuyen a aumentar el volumen y valor de importaciones y exportaciones, ya que la mayoría de la carga va en las bodegas de aviones de pasajeros.
- Los aeropuertos, dependen en gran medida del área de influencia, que contempla tanto las provincias en un radio próximo, como el resto de provincias de ese país que realizan envíos a través de ese aeropuerto o los recibe en él.

Siguiendo el esquema de la Figura 6, observamos cómo la mercancía parte del origen desde el llamado lado tierra, siendo el siguiente paso la consolidación en el

transporte terrestre, que consiste en preparar la carga para ser manipulada e introducida en el avión, atendiendo a sus características, origen y destino.

Posteriormente, se lleva a cabo el handling de carga y de rampa, operación en la que se pasa del lado tierra al lado aire.

- El handling de rampa consiste en la estiba y desestiba de la carga en la aeronave, encontrándose siempre en lado aire.
- El handling de carga es el servicio de asistencia de la carga en lado tierra. Se encarga de consolidar y desconsolidar la mercancía.

Una vez cargada la mercancía en el avión, se procede al transporte de la misma a través de la compañía aérea, desde el origen hasta el destino.

Por último, una vez llegado al destino se procede a las mismas operaciones inversas a las realizadas en el origen (handling de rampa y de carga, desconsolidación de la mercancía y llegada al origen final).

3. Factores relevantes en intermodalidad

Dentro de estos factores, cabe distinguir tres subgrupos distintos:

- Los elementos que intervienen en el proceso de intermodalidad
- Los factores de decisión (factores primarios)
- Los factores condicionantes (factores secundarios), o externalidades
- **Los elementos que intervienen en el proceso de intermodalidad**

En este grupo están incluidos los elementos o agentes que participan en el proceso de la intermodalidad. La intermodalidad se caracteriza por ser un tipo de transporte en el que se realiza a lo largo del recorrido desde el punto origen al destino uno o más intercambios modales.

En estos intercambios modales participan cuatro agentes principales,

- **Los vehículos.** Existen en dicho intercambio modal dos vehículos, el vehículo de entrada (en el cual llega la mercancía al lugar donde se realizará el intercambio modal), y el vehículo de salida (vehículo al que se traspasa la carga desde el vehículo de entrada y en el cual sale la carga del lugar del intercambio modal).
- **El tipo de carga.** Cada tipo de carga exige unas condiciones determinadas para su transporte y manipulación dependiendo de sus características, que condiciona de manera total el tipo de unidad de carga, y por tanto de manipulación de la mercancía en el intercambio modal, condiciones ambientales en el trayecto, etc...

- El equipo de intercambio y la infraestructura. En este grupo se incluye la maquinaria o equipos necesarios para realizar el traspaso de la mercancía del vehículo de entrada al vehículo de salida, así como la infraestructura necesaria que hace posible realizar dicho traspaso en condiciones óptimas.
- Unidad de carga. Hace referencia a las condiciones en las que es transportada la mercancía (contenedor, pallet, etc.), lo que influye directamente en la manera de manipular dicha mercancía en el punto de intercambio modal.

➤ **Los factores de decisión (factores primarios)**

Estos factores son los más importantes a la hora de tomar una decisión sobre la elección de una ruta sobre el resto de las posibles, y son tres:

- Coste. Es generalmente el factor principal de decisión, ya que en la inmensa mayoría de los casos de transporte de mercancías, el coste total es la variable a minimizar. El objetivo principal es que el producto llegue a su destino por el mínimo coste posible dentro de las restricciones que haya en cada en caso.
- Tiempo. Es la segundo variable más importante, ya que hay productos en los que el tiempo es primordial por diversas razones (productos perecederos y alimentarios por ejemplo), es junto con el coste, los dos factores principales a la hora de tomar una decisión sobre la ruta a elegir, bien priorizando el mejor tiempo de ruta o bien el menor coste.
- Viabilidad de la ruta. Tiene que ver con la distancia, los kilómetros recorridos, y también con las condiciones generales de la ruta, es decir, es posible que minimizando el coste se elija una ruta, pero que al estudiar su viabilidad se observen problemas de tipo infraestructura no adecuada, problemas por temas meteorológicos o dificultades puntuales que hagan que es ruta no sea la idónea en ese momento.

➤ **Los factores condicionantes (factores secundarios), o externalidades**

Son factores externos al propio transporte pero que afectan directamente a los factores de decisión.

- Factor técnico. Se refiere a la facilidad técnica del proceso de transporte intermodal en la ruta elegida, por ejemplo la facilidad para realizar el intercambio modal en los nodos, facilidades técnicas para el

transporte (condiciones de las carreteras, necesidad de cambio de ejes en ferrocarril, etc...)

- Trazabilidad. Según el Comité de Seguridad Alimentaria de AECOC, “Se entiende como trazabilidad aquellos procedimientos preestablecidos y autosuficientes que permiten conocer el histórico, la ubicación y la trayectoria de un producto o lote de productos a lo largo de la cadena de suministros en un momento dado, a través de unas herramientas determinadas.” Es decir, la trazabilidad es poder conocer toda la información sobre un producto en todo momento, donde está y por donde ha pasado, en qué condiciones ha sido manipulada, etc. Es un factor condicionante de la ruta ya que hay que tener en cuenta que en la ruta elegida no existan puntos de pérdida de información sobre el producto por motivos varios.
- Congestión de la ruta. Es un problema en auge en estos momentos por la congestión de las carreteras debido al exceso de transporte carretero que colapsa las principales rutas de mercancías, por lo que se intenta desviar mercancía a otros modos de transporte infrautilizados, como el ferroviario o el marítimo. Es un factor condicionante ya que es importante que no exista congestión en la ruta elegida, porque ésta provocaría un aumento en el tiempo de trayecto y un empeoramiento de las condiciones del transporte.
- Condiciones climáticas de la ruta. Es un factor importante sobre todo a la hora de elegir el modo de transporte en el que realizar cada tramo, ya que si en un tramo las condiciones climáticas son adversas, por ejemplo, si son frecuentes las nevadas en ese tramo, el modo carretera no será el indicado para realizarlo sino que se tendrá que pensar en modo ferroviario que es mucho menos sensible a dichas condiciones climáticas adversas, sin embargo si es verano, esto no será un problema, ya que el riesgo de nevadas será casi nulo.
- Factores burocráticos y legales. Existen en algunos casos limitaciones legales y operativas en la aplicación de normas internacionales. También entran en este grupo todo tipo de papeleo necesarios en el transporte, que dependerán a su vez del modo de transporte utilizado. Este tipo de factores ralentizan la actividad del transporte influyendo de modo directo en el tiempo total de transporte de la mercancía (aduanas, albaranes...)
- Estacionalidad. La estacionalidad se refiere a eventos o circunstancias conocidos que se repiten todos los años en un determinado periodo de tiempo, y pueden afectar al transporte de múltiples maneras. Como son circunstancias extraordinarias, pero conocidas de antemano, se

deben de tener en cuenta como factor condicionante en ese momento.

4. Planteamiento del problema de decisión de ruta

En este apartado se va a plantear formalmente el problema de decisión de ruta intermodal entre un origen y un destino dados.

Como se ha explicado anteriormente el objetivo del trabajo de Fin de Master es obtener una metodología para elegir la ruta óptima de transporte de mercancías entre dos puntos conocidos, basándonos en la intermodalidad.

➤ Paso 1.

Conocidos el punto origen y destino de la mercancía, el primer paso es localizar los puntos intermedios entre ambos donde pueda existir intercambios modales. Esto es, como se ha explicado en el punto 2, donde exista la infraestructura necesaria (aeropuerto, puerto y/o estación de ferrocarril intermodal) para que pueda producirse un intercambio modal. A esos puntos les llamaremos nodos intermodales, o simplemente nodos.

El nodo inicial pues será el punto de origen de la mercancía y el nodo final será el destino. Y los nodos intermedios son los que generarán las distintas rutas posibles para la mercancía.

➤ Paso 2

Una vez tenemos identificados todos los nodos del problema, el paso siguiente es asignar unos valores llamados pesos a cada uno de estos nodos, valorando así la calidad de ese nodo para la operación intermodal, teniendo en cuenta los factores relevantes enumerados en el punto 3.

Estos pesos clasificarán de alguna manera a los nodos según sus condiciones sean mejores o peores para el intercambio intermodal de mercancía en ellos, y

ayudaran a su vez en la resolución del problema mediante métodos metaheurísticos (ver anexo IV), al reducir el espacio de búsqueda de soluciones.

La modelización de estos pesos, como función de los factores relevantes en intermodalidad, es uno de los objetivos de la tesis que proseguirá a este Trabajo de Fin de Master, luego en este momento lo importante solo es conocer el concepto y el por qué de su existencia, si bien no se van a valorar numéricamente.

➤ Paso 3

Este es el paso clave, la definición del problema de decisión.

Dependiendo del origen y destino de la mercancía, los nodos intermodales pueden ser un número muy grande, y se trataría pues de un problema basado en combinatoria en el que el número de posibles combinaciones para formar rutas (soluciones) se elevaría exponencialmente con el aumento de puntos intermedios, esto lo convierte en un problema conocido como NP- Completo (ver anexo III), que abarca a todos los problemas que buscan la mejor solución en un espacio de posibles combinaciones (soluciones) muy grande.

Un ejemplo de este tipo de problemas es el Vehicle Routing Problem (VRP) (ver anexo V), en el que nos hemos basado para construir el planteamiento del problema aquí expuesto, si bien nuestra función objetivo y restricciones son distintas al caso general de VRP.

Para resolver este tipo de problemas no se puede utilizar un método que busque la solución exacta, ya que, como se ha explicado anteriormente, las posibles soluciones son un número muy elevado y el tiempo de cálculo de todas ellas sería inviable, por lo que se utilizan en estos casos técnicas metaheurísticas que trabajan por aproximación a la solución exacta, es decir, no calculan todas las posibles soluciones, si no que, por una ponderación, que en nuestro caso aplicaremos a través de los pesos antes mencionados, estos métodos solo calculan las "x" mejores soluciones, ahorrando de esta manera mucho tiempo de cálculo y sacando una solución final muy aproximada a la real.

Para empezar el planteamiento del problema se ha de explicar el objetivo concreto que se persigue, así como las restricciones particulares a las que está sujeto dicho objetivo.

Nuestro objetivo es conseguir la ruta óptima entre un origen y un destino conocidos, pudiendo utilizar o no los distintos modos de transporte que existen y que se han descrito anteriormente (carretera, ferrocarril, marítimo y aéreo) minimizando el coste total del transporte. Es decir, que buscamos, entre todas las posibles combinaciones de ruta, la que menor coste suponga en total.

La función objetivo está sujeta a una serie de restricciones que se exponen a continuación:

Restricción 1. Los tramos escogidos para la ruta final que unirá el origen y el destino deseados, deben ser posibles, es decir, debe existir la infraestructura necesaria en los nodos elegidos para realizar el cambio modal definido en cada uno.

Es decir, si quiero ir de un nodo a otro en modo aéreo debe existir aeropuerto en ambas ciudades con infraestructura adecuada para realizar la manipulación de la mercancía en el intercambio modal.

Debemos pues definir qué modos de transporte son posibles entre cada par de nodos y cuáles no.

Restricción 2. Como se ha explicado en párrafos anteriores, los métodos de resolución que se usarán para este problema, los métodos metaheurísticos, trabajan con un número determinado de soluciones, que se encuentran entre las mejores de las soluciones posibles.

Esta restricción aplica a cada nodo un peso, basándose en sus características intermodales para cada modo de transporte, tomando como referencia para ello los factores comentados en el punto 3, estos pesos ayudan a realizar la selección del orden de nodos para completar la ruta y a su vez pueden ser utilizados por los métodos metaheurísticos como criterio.

De este modo, unos nodos tendrán prioridad sobre otros, y estableceremos así el orden de elección de nodos y modos de transporte para crear las diferentes rutas posibles conectando unos nodos a otros.

Restricción 3. No superar un coste máximo impuesto por el cliente. Esta restricción es opcional, puede existir o puede que, simplemente, lo que se desee sea tener el mínimo coste posible pero sin fijar un máximo.

Restricción 4. Ventanas Temporales. Se trata de fijar una restricción respecto a la hora de llegada de la mercancía a su destino.

Es posible que la mercancía tenga un rango horario límite para llegar a destino, en este caso se impondría una ventana temporal que limite el tiempo total de la ruta, de esta manera, se filtran las rutas que pese a tener buena puntuación en lo que a pesos y coste se refieren, superan este tiempo límite.

Se supone que el problema empieza en el momento en que la carga (ya cargada en el primer modo de transporte) parte hacia el primer nodo intermedio, por tanto la ventana temporal solo tiene sentido en la llegada de la mercancía, tomando como instante inicial el instante de salida de la carga del origen.

5. Formulación del problema

En este punto se va a exponer la formulación del problema planteado en el punto anterior.

Las herramientas matemáticas usadas en este punto son las que posteriormente se habrán de implementar informáticamente para calcular la solución aplicando métodos metaheurísticos como se ha comentado, pero esto último se escapa al alcance de este Trabajo, el cual finaliza planteando la formulación del problema, para posteriormente, a lo largo de la realización de la tesis, modelizar los pesos tanto de los nodos propiamente dichos, como de los arcos que los unen, y poder así, una vez conseguido esa modelización, resolver el problema e implementarlo informáticamente para llegar a una solución que supondrá la decisión de la ruta óptima intermodal.

En primer lugar, se formula la función objetivo, que como se ha visto en el punto anterior, es la de minimizar el coste total de la ruta, por tanto, se formularía de la siguiente manera (Ecuación 1)

$$\min \left(\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{m=1}^4 C^m \times (d_{ij})^m \times (x_{ij})^m + k_j^m \times (x_{ij})^m \right)$$

Ecuación 1. Función Objetivo del problema

En esta expresión se aprecian dos términos diferenciados:

$$C^m \times (d_{ij})^m \times (x_{ij})^m$$

Este primer término hace referencia al coste total entre origen y destino, como sumatorio de los distintos tramos en que dividimos esa ruta de la ruta, pero solo teniendo en cuenta el coste entre los dos nodos, obtenido como multiplicación del coste por kilómetro (C^m) tomado como constante característica para cada modo de transporte m , por la distancia entre los dos nodos de cada tramo recorrido en cada modo de transporte y por x_{ij} , que representa la existencia ($x_{ij}=1$) o la no existencia ($x_{ij}=0$) de conexión intermodal o bien la elección o no elección de ese tramo para determinar la ruta.

Es decir, calcula la suma del coste de cada tramo que forma la ruta total entre origen y destino.

$$k_j^m \times (x_{ij})^m$$

Este término representa el coste por nodo, es decir, el coste que genera la carga, descarga, manipulación, acarreo y demás operaciones que se le deben realizar a la carga desde que llega a un nodo en un determinado modo de transporte hasta que parte del mismo en otro modo distinto. Es decir, los costes que genera el intercambio modal.

Se calcula multiplicando k_j , que es el coste característico del intercambio modal para un determinado modo de transporte m , por x_{ij} , que como se ha explicado en el primer término, representa la existencia o no de conexión intermodal entre ambos.

Este término es el que valora el “coste intermodal”, no solo genera coste el transporte de la mercancía en relación a los kilómetros recorridos, sino también genera costes de un orden equivalente, o incluso superior dependiendo de los casos, las operaciones precisadas por la carga para cambiar de modo.

En esta fórmula aparecen diversas variables y diversos parámetros que se explican a continuación.

i, j : son respectivamente los nodos inicial y final de cada tramo limitado por dos nodos, puede haber un número indefinido de nodos, ya que el origen y el destino pueden ser cualesquiera, por eso hay que tomarlos hasta N (número total de nodos), ya que la ruta final estará compuesta de diversos tramos.

m : es un superíndice que indica el modo de transporte empleado para llegar de un nodo i a otro nodo j . Se evalúa del 1 al 4, puesto que existen cuatro modos considerados (aéreo, marítimo, ferroviario y carretera).

C^m : es un parámetro que indica el coste por kilómetro recorrido (expresado en €/km) del modo de transporte m .

Este coste se estimará según las consideraciones explicadas en el anexo II, y será una constante para cada modo de transporte.

$(d_{ij})^m$: es una variable que representa la distancia en kilómetros que separa el nodo i del nodo j, yendo de i a j mediante el modo de transporte m, ya q la distancia en kilómetros de un nodo a otro varía según sea el modo de transporte utilizado, no es lo mismo por ejemplo, ir de Barcelona a Cádiz por carretera o por mar, ya que la ruta cambia y por tanto el número de kilómetros recorridos también.

$(x_{ij})^m$: es una variable que representa si en la ruta que se está configurando como posible solución está incluido el tramo de i a j por el modo m o no lo está.

Es decir, es una variable que toma los valores {0, 1} según si ese tramo está incluido (valor 1) o no lo está (valor 0). Puede no estar incluido por no existir conexión intermodal para ese modo de transporte en ese nodo o bien porque hay otro modo prioritario entre ambos nodos.

$(k_j)^m$: es una variable que indica el coste del nodo j, es decir, el coste de las operaciones que se realizan a la mercancía en ese nodo, desde que llega cargada en un modo de transporte, hasta que sale del nodo cargada ya en otro modo distinto.

Previamente a la formulación de las restricciones del problema, hay que definir una serie de parámetros del problema, que son los siguientes:

Matrices de distancias

Hay que definir cuatro matrices de distancias correspondientes a los cuatro modos de transporte posibles, en las que definiremos el número de kilómetros que separan todos los nodos entre sí mediante cada modo de transporte. Serían de la forma:

Modo 1	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4
Nodo 1	x	d_{12}	d_{13}	d_{14}
Nodo 2	d_{12}	x	d_{23}	d_{24}
Nodo 3	d_{13}	d_{23}	x	d_{34}
Nodo 4	d_{14}	d_{24}	d_{34}	x

Donde cada uno de los nodos son las ciudades consideradas como nodos intermedios donde existe intermodalidad. Esta matriz hay que realizarla para cada uno de los cuatro modos de transporte y serán de dimensión NxN, siendo N el número total de nodos.

Costes por tramo

Hay que definir también los costes por kilómetro para cada modo de transporte, es decir: C^a , C^m C^f y C^c (costes aéreo, marítimo, ferroviario y carretero

respectivamente), expresados en €/km, calculando el coste medio característico para cada modo de transporte.

Matriz de costes por nodo

También hay que definir los costes por nodo, para cada nodo y para cada modo de transporte

Kj	aéreo	carretera	ferrocarril	marítimo
Nodo 1				
Nodo 2				
Nodo 3				

Esta matriz será de dimensión Nx4, y se realizará una modelización para calcular el coste en cada nodo, en base a los factores relevantes de la intermodalidad mencionados en numerosas ocasiones a lo largo de este trabajo.

Velocidades características

Hay que definir por último, las velocidades características de cada modo de transporte, que consideraremos constantes: V^a , V^f , V^c y V^m .

A continuación, una vez definidos los parámetros y las variables del problema, lo siguiente es formular las restricciones.

Restricción 1. Debe existir la posibilidad de intercambio modal entre cada uno de los nodos elegidos en la ruta final.

Es decir, si quiero ir de un nodo a otro en modo aéreo debe existir aeropuerto en ambas ciudades con infraestructura adecuada para realizar la manipulación de la mercancía en el intercambio modal.

Para formular esa restricción de necesita definir cuatro matrices más, de dimensión NxN, siendo N el número total de nodos incluidos en el problema, de manera que en cada una de ellas se evalúe para un modo de transporte diferente la existencia o no de conexión intermodal entre los distintos nodos. Identificaremos con un 1 las conexiones que si sean posibles entre dos nodos y con un 0 las que no lo sean. A continuación se muestra como sería el formato de esta matriz

Modo 1	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4
Nodo 1	x	0	0	1
Nodo 2	0	x	1	1
Nodo 3	0	1	x	0
Nodo 4	1	1	0	x

Restricción 2. Mediante esta restricción se aplican unos pesos a los nodos, modelizados estos pesos teniendo en cuenta los factores relevantes en intermodalidad (cantidad de emisiones, congestión de ese modo de transporte, estacionalidad, factor

técnico...) que otorgan una “prioridad” en la elección del nodo cuanto mayor sea dicho peso, y ayudan a reducir el espacio de búsqueda.

Es decir, para crear una ruta, se parte del origen (primer nodo) y se tiene que evaluar de alguna forma al resto de nodos para elegir cuál será el siguiente elegido y mediante qué modo de transporte. Para ello se asignan los pesos. De esta forma también se consigue a través de estos pesos reducir el espacio de búsqueda.

Partiendo del origen, se elige como siguiente nodo el que tenga un mayor peso asignado, ya que se da por supuesto que si su peso es alto es porque sus características para la intermodalidad son mejores. Y así sucesivamente hasta llegar al nodo destino.

La formulación sería de la siguiente forma:

$M_N^m = \{0..5\}$ estos valores 0..5 han sido puesto al azar, ya que estos pesos aun están por modelizar. Estos valores indican el peso que cada nodo tendría respecto a cada modo de transporte. Se realiza la matriz de ponderación (que abarca todos los pesos de los nodos respecto a cada modo de transporte)

	aéreo	carretera	marítimo	ferrocarril
Nodo 1	M_1^a	M_1^c	M_1^m	M_1^f
Nodo 2	M_2^a	M_2^c	M_2^m	M_2^f
Nodo 3	M_3^a	M_3^c	M_3^m	M_3^f
Nodo 4	M_4^a	M_4^c	M_4^m	M_4^f

Restricción 3. No superar un coste máximo impuesto por el cliente (C_{\max}).

Esta restricción es opcional, en caso de existir, la formulación sería una restricción matemática en la función objetivo

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{m=1}^4 C^m \times (d_{ij})^m \times (x_{ij})^m + k_j^m \times (x_{ij})^m \leq C_{\max}$$

De este modo si el cliente tiene una cantidad máxima para invertir en el transporte de esa mercancía, se pueden eliminar el resto de soluciones que superen este coste máximo.

Restricción 4. Ventanas Temporales. Se trata de fijar una restricción respecto a la hora de llegada de la mercancía a su destino.

Es decir, la mercancía tiene que estar en un determinado momento del tiempo en destino por obligación. En este caso establecemos una ventana temporal en destino, de manera que todas las opciones de ruta que superen dicha ventana serán descartadas.

La formulación de las ventanas temporales es de la siguiente manera:

$$t_d \leq t_o + \sum_{m=1}^4 \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \left((d_{ij}^m) / V^m \right) \times (x_{ij}^m) \in V_d (a_d, b_d)$$

Siendo:

t_d – instante de llegada al destino

t_o – instante salida del origen

$\left((d_{ij}^m) / V^m \right)$ – representa el tiempo consumido en recorrer todas las distancias de todos los tramos recorridos desde el origen al destino final a una velocidad, calculadas dividiendo la distancia entre cada par de nodos d_{ij} por el modo m entre la velocidad característica de cada modo de transporte considerada constante, V^m del modo de transporte utilizado en cada tramo.

$V_d (a_d, b_d)$ – es la ventana temporal en el destino, mercancía debe llegar al destino final entre el instante a_d y el instante b_d , definidos previamente según las especificaciones del cliente.

Solo de sumaran a t_0 los términos cuyo x_{ij} sea igual a 1, es decir, solo a los tramos que se recorran en cada ruta.

6. Conclusiones

Tras el estudio realizado en este Trabajo de Fin de Master, se pueden sacar las siguientes conclusiones.

- La intermodalidad hoy en día es necesaria, debido principalmente al abuso en los últimos años del uso de la carretera para el transporte de mercancías, que ha generado una gran congestión en las carreteras y ha generado un alto grado de emisiones, siendo preocupante en ambos aspectos. Es por ello que en los últimos años están surgiendo iniciativas para conseguir desviar parte de la mercancía a otros modos de transporte, principalmente al ferrocarril por tratarse de un modo de transporte medioambientalmente sostenible y con una infraestructura capaz de asumir mayor porcentaje de carga que la que actualmente acoge, ganando importancia por ello el uso de la intermodalidad.
- Para llevar a cabo transporte intermodal de mercancías es necesario conocer y estudiar los procesos de intercambio modal entre los distintos modos. Cada uno de ellos se realiza en un lugar concreto, y precisa de una maquinaria e infraestructura adecuada para poder realizar este intercambio de la manera más rápida, eficiente y económica posible.
- Los factores de mayor relevancia en el transporte intermodal se dividen en tres tipos, los elementos que intervienen en el proceso (vehículos, carga, equipo de intercambio modal y unidad de transporte de mercancía) que son los agentes que intervienen en el proceso
- propiamente dicho. Los factores primarios o decisivos son los que más importancia tienen a la hora de tomar una decisión sobre si optar o no

por la intermodalidad, éstos son coste (como factor prioritario), tiempo (ya que hay ocasiones en que prima que la mercancía llegue lo antes posible que el precio, por ejemplo en los perecederos, que han de estar un máximo de tiempo en el transporte ya que de lo contrario se echaría a perder la propia mercancía), y viabilidad de la ruta (sin la cual no es posible llevarla a cabo). Por último los factores secundarios, que son los que acaban influyendo en los elementos que intervienen en el proceso y por tanto en los factores primarios (congestión de la ruta, trazabilidad, estacionalidad...).

- Se ha planteado y formulado formalmente el problema de elección de una ruta intermodal para transportar mercancía de un punto a otro, basándonos en un problema de optimización lineal, con una función objetivo para minimizar el coste total del transporte de origen a destino, y una serie de restricciones necesarias para obtener la mejor solución.
- Se deja abierto el camino hacia una tesis que prosiga con el problema planteado y en la que se modelizará el cálculo de coste por nodo y por arco, y se resolverá el problema mediante técnicas metaheurísticas que permiten calcular una solución cercana a la optima cuando el número de posibles soluciones es tan grande que hace que inviable calcularlas todas.