

# OPTIMIZACIÓN DE RUTAS PARA TRANSPORTE DE TEUS

EDUARDO BEZARES CARRETERO  
JUAN FRANCISCO PÉREZ CABALLERO

30 de mayo de 2014

# Índice

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Introducción</b>  | <b>3</b>  |
| 1.1. Costos . . . . .   | 4         |
| <b>2. Formulación matemática</b>  | <b>6</b>  |
| 2.1. Notación . . . . .   | 6         |
| 2.2. Función objetivo (Objective Function) . . . . .  | 7         |
| 2.3. Restricciones (subject to) . . . . .   | 8         |
| <b>3. Implementación y Ejecución del programa</b>   | <b>9</b>  |
| 3.1. Parámetro decisión . . . . .   | 14        |
| <b>4. Análisis de HUBs alternativos en flujo de mercancías para tráficos entre Sudamérica y África occidental</b> | <b>16</b> |
| 4.1. Datos . . . . .  | 16        |
| 4.1.1. Rutas . . . . .  | 16        |
| 4.1.2. Datos de puertos . . . . .   | 17        |
| 4.1.3. Datos de Barcos . . . . .  | 18        |
| 4.1.4. Datos de distancias . . . . .  | 19        |
| 4.1.5. Datos de importación y exportación . . . . .   | 19        |
| 4.2. Solución Óptima . . . . .  | 20        |
| 4.2.1. Escenario 1. Problema relajado . . . . .   | 21        |
| 4.2.2. Escenario 2. . . . .   | 22        |
| 4.2.3. Escenario 3. . . . .   | 23        |
| 4.2.4. Escenario 4. . . . .   | 24        |
| 4.2.5. Escenario 5. . . . .   | 25        |
| 4.2.6. Escenario 6. . . . .   | 26        |
| 4.2.7. Escenario 7. Óptimo heurístico . . . . .   | 27        |
| <b>5. Conclusiones</b>  | <b>28</b> |
| <b>A. Guía de instalación y uso</b>   | <b>28</b> |
| A.1. Instalación del Textpad y sus herramientas . . . . .   | 29        |
| A.2. Cambiar datos . . . . .  | 29        |
| A.3. Ejecutar . . . . .   | 30        |

## Índice de figuras

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1. | Ejemplo de modelo en lenguaje AMPL . . . . .                        | 10 |
| 2. | Ejemplo de modelo en lenguaje AMPL (continuación) . . . . .         | 11 |
| 3. | Ejemplo de archivo de datos en lenguaje AMPL . . . . .              | 12 |
| 4. | Ejemplo de archivo de datos en lenguaje AMPL (continuación) . . . . | 13 |
| 5. | Ejemplo de archivo ejecución en lenguaje AMPL . . . . .             | 15 |
| 6. | Esquema de las posibles rutas . . . . .                             | 17 |

## Índice de cuadros

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.  | Notación Matemática . . . . .                   | 6  |
| 2.  | Datos de puertos. Datos generales . . . . .     | 17 |
| 3.  | Datos de puertos. Tasas fijas . . . . .         | 18 |
| 4.  | Datos de puertos. Tasas variables . . . . .     | 18 |
| 5.  | Datos de Barcos. . . . .                        | 18 |
| 6.  | Datos de Distancias. . . . .                    | 19 |
| 7.  | Datos de Importaciones y exportaciones. . . . . | 19 |
| 8.  | Solución 1 . . . . .                            | 21 |
| 9.  | Solución 2 . . . . .                            | 22 |
| 10. | Solución 3 . . . . .                            | 23 |
| 11. | Solución 4 . . . . .                            | 24 |
| 12. | Solución 5 . . . . .                            | 25 |
| 13. | Solución 6 . . . . .                            | 26 |
| 14. | Solución 7 . . . . .                            | 27 |

# 1. Introducción

La deslocalización de tráfico marítimo y aéreo gestionados por la competencia es ambición permanente de responsables de puertos y aeropuertos. Este artículo plasma un procedimiento de optimización de rutas, que puede ayudar al operador, al cargador y a la autoridad portuaria a reconsiderar la ruta existente conjugando factores de coste y tiempo. El tipo de ruta que el procedimiento creado optimiza son las propias rutas marítimas, en la cual pueden intervenir distintos tipos de barcos. La consideración de óptimo de una ruta se basa, sobre todo, en el hecho de que posea el menor costo, es decir, el dinero invertido en el transporte y en la gestión y manipulación de las mercancías sea el menor posible.

En este informe se describe la creación de un procedimiento y su programación en lenguaje AMPL para crear un programa que optimice el transporte en rutas marítimas. El programa se ha creado específicamente para optimizar las posibles rutas entre Sudamérica y África occidental pero, tras la implementación del programa, se podrá optimizar todo tipo de rutas sin más que cambiar los datos. Cabe y es importante destacar que el programa tiene en cuenta tanto contenedores vacíos como llenos y no les da el mismo trato, es decir, no les obliga a utilizar la misma ruta. El solver utilizado para optimizar es el MINOS 5.5, ya que es capaz de resolver funciones no lineales como la que nosotros usaremos en el objetivo, aunque posee ciertas limitaciones que se describen más adelante y que obligan a seguir una estrategia de simulación de escenarios.

Al crear el programa se necesitarán varios ficheros para tener bien estructurada cada una de los componentes del programa. Por un lado, tendremos un archivo con el formato .mod que contendrá el modelo matemático a optimizar, el cual no variaremos una vez creado el programa a no ser que sea necesario. Por otro lado, nos encontraremos un archivo con el formato .dat, el cual poseerá los datos específicos de nuestro problema como, en este caso, los datos de los puertos de Sudamérica y África, barcos, tiempos, etc. El tercer archivo que aparecerá será el archivo ejecución, el cual hará las labores de ejecución. Por último, tendremos el archivo de la solución, con los valores óptimos encontrados por el programa, es decir, qué tipo de barco y qué ruta elegir para minimizar los costos.

El procedimiento a seguir para obtener una solución definitiva será el de optimizar diversos escenarios posibles dentro de los márgenes lógicos. Para ello se variará el valor de unos parámetros binarios llamados parámetros decisión. Esta estrategia de escenarios se debe seguir debido a que el solver sólo encuentra el óptimo global si tratamos con una función objetivo conexa. Como ese no es nuestro caso, no siempre encuentra la mejor solución global, sino que encuentra óptimos locales y los devuelve como solución, siendo por ello necesario crear restricciones más fuertes que ayuden a la resolución bajo unas circunstancias determinadas. Si se poseyera un solver más potente u otro lenguaje que permita la resolución directa, no sería necesario el uso de la estrategia de escenarios. En este caso se ha seguido la estrategia descrita al no disponer de otro resolutor de mayor generalidad para problemas como el que nos enfrentamos, es decir, de función objetivo no convexa.

Una vez obtenida la solución, se podría cambiar algunos datos de coste para obtener soluciones en casos similares. tras examinar los casos posibles, se legirá ña solución que menos aumente los costos al aplicarla a los otros escenarios estudiados para así poder afrontar de manera adecuada (aunque no óptima) una gran variedad de escenarios y sortear la estocasticidad de la vida real. De este modo ponemos solución a la estocasticidad del mundo real en el que vivimos y podemos utilizar estimadores a la hora de cuantificar los costos y los flujos. También será posible aumentar las restricciones del problema como, por ejemplo, obligando a utilizar solo un tipo de barco en una determinada conexión o obligar a utilizar puertos y conexiones específicos, dando solución así también a posibles problemas políticos y económicos de los países, como pueden ser guerras que no permitan el uso de determinados puertos, etc.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es el hecho de la posibilidad de empaquetamiento y autoejecución que ofrece el programa que se está creando. En principio, se podría linkar este programa a otro escrito en C++ que lo llamara a modo de subrutina. En dicho programa en C++, es posible cambiar los datos del problema utilizando una interfaz más dinámica y menos estable aunque esto supon-dría perdida a la hora de introducir cambios en el programa. La manera óptima de tratar el programa es entender su escritura y saber cambiar los datos. Un capítulo de este informe está dedicado a enseñar la construcción del programa y a encarar posibles cambios en él.

## 1.1. Costos

Los costos que se han utilizado se han basado en los descritos por Chaug-Ing y Yu-Ping (2006, 2007) que engloban todos los costos relacionados con la navegación, aunque los hemos actualizados para que se ajusten mejor a nuestras necesidades y a nuestro objetivo. Dichos costos son los costos de navegación y costos de inventario.

### COSTO DE NAVEGACIÓN

Los costos de navegación los podemos dividir en tres subcategorías: En primer lugar nos encontramos con los costos operativos y de capital, que representa todos los gastos por usar el barco durante el tiempo requerido, incluyendo algunos costos como los costos de posesión del barco, salarios y dietas de la tripulación, seguros, reparaciones, etc. El tiempo que dura estos pagos, que es lo que indicará el costo final ya que el costo diario es un parámetro fijo, se calcula sumando el tiempo en ruta más el tiempo de atraque y el tiempo que se tarde en el handling de TEUs.

La segunda subcategoría viene dada por el costo de combustible, que es proporcional a la distancia recorrida ya que asumimos que los barcos mantienen una velocidad constante. Además tenemos que tener en cuenta el costo del fuel durante las maniobras portuarias en cada puerto. Cada barco tiene diferentes tipos de costos en este caso. La tercera subcategoría viene dada por las tasas portuarias, tanto fijas como variables proporcionales al tiempo en puerto. Incluye las tasas de estibadores, practicaje, utilización del espacio, etc.

Es importante mencionar que no todos los componentes de los costos están relacionados con la frecuencia ya que, por ejemplo, el tiempo que se tarda en el manejo de contenedores va a ser constante porque la demanda es constante en nuestro estudio.

## **COSTO DE INVENTARIO**

Los costos de inventario representan el costo por la pérdida de la oportunidad de venta o disminución del valor durante el transporte ya que, en ese periodo, el material no puede ser usado ni vendido. Estos costos son directamente proporcionales al volumen y valor de la carga y al tiempo de viaje pero indirectamente proporcionales a la frecuencia (ya que a mayor frecuencia menos tiempo de ruta y en puerto) Existen dos subcategorías: el costo por el tiempo de espera, debido a retrasos en los puertos de carga o en los lugares de producción, y el costo por el tiempo en ruta, cuyo tiempo se calcula de la misma manera que en el caso de los costos de navegación.

## 2. Formulación matemática

Procederemos a describir la función objetivo y las restricciones usando notación lógico-matemática para describirlas de la mejor forma posible. Previamente, se procede a describir la notación usada, es decir, el significado de las letras utilizadas que designan objetos de costo o variable y los subíndices definidos dentro de unos conjuntos establecidos.

### 2.1. Notación

#### Sets:

|   |  |
|---|--|
| B | →set de barcos                             |
| P | →set de Puertos                            |
| M | →set de rutas $\equiv$ arcos entre puertos |

#### variables:

|             |  |
|-------------|--|
| $X_{ijt}$   | →Flujo de TEUs llenos desde el puerto $i$ al $j$ por el barco $t \forall (i, j) \in M; \forall t \in B$                    |
| $X_{ijt}^*$ | →Valor de mercancías desde el puerto $i$ al $j$ por el barco $t$ en miles de euros $\forall (i, j) \in M; \forall t \in B$ |
| $Y_{ijt}$   | →Flujo de TEUs vacíos desde el puerto $i$ al $j$ por el barco $t \forall (i, j) \in M; \forall t \in B$                    |

#### Parámetros:

|                |   |
|----------------|---|
| $Q_i$          | →TEUs de exportación/importación (+/-) en el puerto $i \forall i, j \in P; \forall t \in B$   |
| $Q_i^*$        | →Valor en miles de euros de exportación/importación (+/-) en el puerto $i \forall i, j \in P; \forall t \in B$                                |
| $O_t$          | →Costo operativo diario del barco tipo $t \forall t \in B$  |
| $D_{i,j}$      | →Distancia desde el puerto $i$ al $j \forall i, j \in P$  |
| $F_t$          | →Costo de combustible por milla náutica del barco $t \forall t \in B$   |
| $F_{it}$       | →costo de combustible del barco $t$ en el puerto $i \forall i \in P; \forall t \in B$   |
| $V_t$          | →velocidad media de un barco tipo $t \forall t \in B$   |
| $U_t$          | →Capacidad del barco tipo $t$ en TEUs $\forall t \in B$   |
| $G_i$          | →tasa de pago por TEU manejado en el puerto $i \forall i \in P$   |
| $R_i$          | →Ratio diario de manejo de TEU $\forall i \in P$  |
| $W_i$          | →Tiempo que pasa un barco en el proceso de llegada o salida en el puerto $i \forall i \in P$  |
| $\alpha_{it}$  | →Pago fijo de un barco $t$ en el puerto $i \forall i \in P; \forall t \in B$  |
| $\beta_{it}$   | →pago variable de un barco tipo $t$ en el puerto $i \forall i \in P; \forall t \in B$   |
| $T$            | →Porcentaje del valor de la carga que se paga al día mientras dure el transporte  |
| $S$            | →Tiempo para el que poseemos los datos  |
| $v$            | →Valor medio de un contenedor vacío   |
| $\delta_{ijt}$ | →1 si el barco $t$ se puede utilizar en el arco $(i, j)$ en el escenario a optimizar, 0 en otro caso. $\forall (i, j) \in M; \forall t \in B$ |

Cuadro 1: Notación Matemática

## 2.2. Función objetivo (Objective Function)

La función objetivo de los costos totales esta basada en los descritos previamente, los cuales tenemos que minimizar. Una vez establecida la notación que se utilizará a partir de ahora, se pueden describir los costos utilizando modelos matemáticos fácilmente entendibles según sus subcategorías y considerando a  $\frac{X_{ijt}}{U_t}$  la cantidad de veces que se realiza un viaje en cada arco.

En primer lugar, dentro de los costos de navegación nos encontramos con los costos operativos, que no es más que el costo operativo diario  $O_t$  por el tiempo que dedica un barco en recorrer una ruta. Dicho tiempo se puede expresar para cada arco y cada barco como la suma del tiempo en movimiento más el tiempo en los puertos durante el atraque y el tiempo que transcurre durante la manipulación de contenedores, es decir,  $(\frac{D_{ij}}{V_t}) + (W_i + W_j + (\frac{X_{ijt}}{R_i} + \frac{X_{ijt}}{R_j}) \frac{U_t}{X_{ijt}})$ , y lo mismo si consideramos contenedores vacíos. En el caso del fuel, los costos se pueden expresar para cada arco y cada barco como  $F_t \cdot D_{i,j} + F_{it} + F_{jt}$ . Por último, el coste fijo y variable por las tasas de los puertos se puede expresar de la siguiente manera para cada arco y cada barco  $\alpha_{i,t} + (\frac{\beta_{it}}{R_i} + G_i + \frac{\beta_{jt}}{R_j} + G_j)(X_{ijt})$ , e igualmente para contenedores vacíos. Finalmente, tras multiplicar estos costos por la frecuencia y sumarle todos los arcos, la función de costo de navegación a optimizar es:

**coste de navegación**

$$\begin{aligned} & \sum_{(i,j) \in M} \sum_{t \in B} \frac{X_{ijt} + Y_{ijt}}{U_t} (\alpha_{it} + O_t \cdot (W_i + W_j) + F_{i,t} + F_{j,t} + D_{ij} \cdot (\frac{O_t}{V_t} + F_t)) + \\ & + \sum_{(i,j) \in M} \sum_{t \in B} (G_i + G_j + \frac{\beta_{it}}{R_i} + \frac{\beta_{jt}}{R_j} + \frac{O_t}{R_i} + \frac{O_t}{R_j}) \cdot (X_{ijt} + Y_{ijt}) \end{aligned}$$

Para el caso de costos de inventario, podemos diferenciar el costo por tiempo de espera, el costo por tiempo de viaje y el costo por tiempo en barco, resultando el costo total simplemente como la suma de los tres y quedando expresada, respectivamente, de la forma descrita a continuación teniendo en cuenta los contenedores llenos y vacíos y la frecuencia. Los tiempos en puerto y en viaje se obtienen de la misma manera que para el costo de navegación.

**coste de inventario**

$$\begin{aligned} & + \frac{S \cdot T}{2} \cdot \sum_{(i,j) \in M} \sum_{t \in B} (\frac{U_t}{X_{ijt}} X_{ijt}^* + U_t \cdot v) \\ & + T \cdot \sum_{(i,j) \in M} \sum_{t \in B} (X_{ijt}^* + v \cdot (X_{ijt} + Y_{ijt})) \cdot (W_i + W_j + \frac{D_{ij}}{V_t} + U_t \cdot (\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j})) + \end{aligned}$$

**NOTA:** Esta función no está definida cuando la cantidad transportada es 0, por eso, a la hora de crear el código del programa, se debe crear un caso diferente para cuando la variable correspondiente a la cantidad transportada es 0, es decir, mediante una declaración tipo *if* debemos excluir el caso cuando las variables valgan 0, asignándoles en este caso el costo 0 las componentes del costo de inventario que



dependan de él. Matemáticamente, si llamamos  $C_I^1$ ,  $C_I^2$  y  $C_I^3$  a las tres subcomponentes del costo de inventario (equivalente en nuestra formula a agrupar las líneas de dos en dos), podemos representar al fórmula para cada arco como se expresa a continuación, y siendo el costo final la suma de todos los arcos

$$\text{Costo de inventario} = \begin{cases} C_I^1 + C_I^2 + C_I^3 & \text{Si } X_{ijt} > 0 \\ 0 & \text{Si } X_{ijt} = 0 \end{cases}$$

### 2.3. Restricciones (subject to)

- La primera familia de restricciones representa el cumplimiento de las cantidades anuales de importación o exportación en TEUs. La restricción obligará al solver a que la cantidad de teus que salga de cada puerto, sumando todas las posibles direcciones de salida que pueda tomar, menos la cantidad de teus que le entre, contando la suma de todas las posibles procedencias, coincida con la cantidad especificada de exportación o importación. Si es 0, se tratará de un hub de transito:

$$\forall i \in P : \sum_{(i,j) \in M} \sum_{t \in B} (X_{ijt} - X_{jit}) = Q_i$$

- La segunda familia de restricciones representa el cumplimiento el retorno de los contenedores considerando que todos los contenedores vuelven. La restricción obligará al solver a que la cantidad de teus vacíos que salga de cada puerto, sumando todas las posibles direcciones de salida que pueda tomar, menos la cantidad de teus que le entre, contando la suma de todas las posibles procedencias, coincida con el opuesto de la cantidad demandada o exportada, cumpliéndose así que todos los contenedores que llegan llenos se deben marchar vacíos y para que se marcha un contenedor lleno debe de tener uno vacío que haya llegado previamente. Si es 0, se tratará de un hub de transito:

$$\forall i \in P : \sum_{(i,j) \in M} \sum_{t \in B} (Y_{ijt} - Y_{jit}) = -Q_i$$

- La tercera familia de restricciones representa el mismo objetivo que la primera pero considerando el valor de la mercancía y no la cantidad de TEUs que lleva. Tras obtener la solución óptima, si resulta óptimo distribuir la carga entre dos tipos de barcos, se llevara la carga mas valiosa en el barco de mayor velocidad.

$$\forall i \in P : \sum_{(i,j) \in M} \sum_{t \in B} (X_{ijt}^* - X_{jit}^*) = Q_i^*$$

- Restricción que impide utilizar la variable de valor en un barco determinado si ese barco no es usado para transportar TEUs. M representa un valor suficientemente grande.

$$\forall (i,j) \in M, t \in B : X_{ijt}^* \leq X_{ijt} \cdot M$$

- Restricción artificial para ayudar a encontrar la solución óptima fijando los tipos de barco a usar. Esta restricción se utiliza para el caso de no poseer el solver adecuado y tener que utilizar una estrategia de simulación de escenarios. Esta restricción se puede ver como una cota superior de la variable de transporte de TEUs.  $M$  representa un valor suficientemente grande.

$$\forall (i, j) \in M, t \in B : X_{ijt} \leq \delta_{ijt} * M$$

### 3. Implementación y Ejecución del programa

Para implementar el programa se procederá a la creación de 4 archivos distintos. Dichos archivos se podrán crear utilizando cualquier procesador de textos planos, aunque es recomendable utilizar el textpad tras haberle instalado al sintaxis AMPL. Para ello, en la pagina web oficial de la aplicación ([www.textpad.es](http://www.textpad.es)) se deberá descargar el archivo llamado `ampl.syn` y, siguiendo las instrucciones detalladas, instalarlo. Con ello se consigue resaltar cada uno de las funciones definidas para el AMPL, tal y como se muestran en las imágenes adjuntadas más adelante en este documento.

El primer archivo se le llamará modelo y tendrá la extensión `.mod`. Su función es poseer el modelo escrito en lenguaje AMPL para ser cargado posteriormente. Este archivo no será modificado una vez confirmado que funciona a no ser que se requiera una nueva restricción independiente de las ya existentes. La estructura del archivo es, en primer lugar, las declaraciones de sets, parámetros y variables y las familias en las que se mueven sus índices. Todo se acompaña de una breve descripción del uso del parámetro. En segundo lugar, aparece la función objetivo a optimizar, cuya descripción ya ha sido detallada previamente en este informe. Por último nos encontramos con las restricciones, que también siguen el patrón descrito anteriormente. El archivo del modelo para nuestro problema queda definitivamente de la siguiente forma:

```

# Set y parámetros de Puertos
set Puertos;
param tasa_contenedor {Puertos};
param ratio_contenedor {Puertos};
param tiempo{Puertos};
param Q {Puertos };
param Q_valor {Puertos };

# Puertos que podrían formar parte de rutas
# Pago medio por contenedor manejado en el puerto i
# Ratio de tiempo de carga y descarga de contenedores
# Tiempo transcurrido en el puerto i durante el atraque y la salida
# Cantidad de TEUs que sale (+) o entra (-) del puerto i de mercado
# Cantidad de producto en miles de euros que sale o entra del puerto i de exportación/importación

# Set y parámetros de Barcos
set Barcos;
param capacidad {t in Barcos};
param velocidad {t in Barcos};
param costo_diario {t in Barcos};
param fuel_km {t in Barcos};

# Set de tipos posibles de barcos a usar
# Capacidad del barco tipo t
# Velocidad del barco tipo t
# Costo diario por barco del tipo t
# Costo por milla navegada por barco del tipo t

# parámetros de barcos y puertos
param fuel_puerto {t in Barcos,Puertos};
param tasa_fija {t in Barcos,Puertos};
param tasa_variable {t in Barcos,Puertos};

# Costo del fuel en el puerto i para el barco tipo t
# Tasa fija mínima por barco t en puerto i
# Costo diario por barco del tipo t

# Otros parámetros
set arcos within {Puertos} cross {Puertos};
param perdidas;
param temporada;

# arcos entre puertos representando las conexiones
# Valor diario de pérdidas por TEU almacenado
# Longitud de la temporada en días

```

Figura 1: Ejemplo de modelo en lenguaje AMPL

```

param valor_contenedor;
param distancia {(i,j) in arcos};
param decision {(i,j) in arcos, Barcos};
param porcentaje;

# valor de un contenedor
# distancias entre puertos
# Decisión de barco t hace la conexión i -> j
# porcentaje de retorno por canarias

# Variables
#var decision {(i,j) in arcos, Barcos} binary;
# variable de decisión de barco en cada conexión. 1 si el barco t hace la conexión
# i -> j en la ruta m

var X {(i,j) in arcos, t in Barcos} >=0;
# Cantidad de TEUs llenos transportados en el arco (i,j) por trayecto
var Y {(i,j) in arcos, t in Barcos} >=0;
# Cantidad de TEUs vacíos transportados en el arco (i,j) por trayecto
var XV {(i,j) in arcos, t in Barcos} >=0;
# Valor de transportados en el arco (i,j) por trayecto

# Función objetivo
minimize cost;
#shipping costs

sum {(i,j) in arcos, t in Barcos} (X[i,j,t]/capacidad[t] * (tasa_fija[t,i] + costo_diario[t]*tiempo[i] + fuel_puerto[t,i] + distancia[i,j]*
(costo_diario[t]/velocidad[t] + fuel_km[t])) + sum {(i,j) in arcos, t in Barcos} (Y[i,j,t]/capacidad[t] * (tasa_fija[t,i] + costo_diario[t]*
tiempo[i] + fuel_puerto[t,i] + distancia[i,j]* (costo_diario[t]/velocidad[t] + fuel_km[t])) +
sum {(i,j) in arcos, t in Barcos} ((tasa_contenedor[i] + tasa_contenedor[j] + tasa_variable[t,i]/ratio_contenedor[i] + tasa_variable[t,j])/
ratio_contenedor[j] + costo_diario[t]/ratio_contenedor[j]) * X[i,j,t]) + sum {(i,j) in arcos, t in
Barcos} ((tasa_contenedor[i] + tasa_contenedor[j] + tasa_variable[t,i]/ratio_contenedor[i] + tasa_variable[t,j]/ratio_contenedor[j] +
costo_diario[t]/ratio_contenedor[i] + costo_diario[t]/ratio_contenedor[j]) * Y[i,j,t]) +
sum {(i,j) in arcos, t in Barcos} ((XV[i,j,t] + valor_contenedor * X[i,j,t]) * (tiempo[i] + tiempo[j] +
distancia[i,j]/velocidad[t])) +
perdidas * sum{(i,j) in arcos, t in Barcos} ((XV[i,j,t] + valor_contenedor * X[i,j,t]) * (tiempo[i] + tiempo[j] +
distancia[i,j]/velocidad[t])) +
perdidas * sum{(i,j) in arcos, t in Barcos} ((XV[i,j,t] + valor_contenedor * Y[i,j,t] * (tiempo[i] + tiempo[j] + distancia
[i,j]/velocidad[t])) +
perdidas * sum{(i,j) in arcos, t in Barcos} (if X[i,j,t]<=0 then 0 else (1/(X[i,j,t]/capacidad[t]) * XV[i,j,t])) + temporada*
perdidas/2 * sum{(i,j) in arcos, t in Barcos} (if Y[i,j,t]<=0 then 0 else (1/(Y[i,j,t]/capacidad[t]) * valor_contenedor*Y[i,j,t])) +
perdidas * sum{(i,j) in arcos, t in Barcos} (if X[i,j,t]<=0 then 0 else ((1/(X[i,j,t]/capacidad[t]) * (XV[i,j,t] + valor_contenedor * X[i,j,t])
* (X[i,j,t]/ratio_contenedor[i] + X[i,j,t]/ratio_contenedor[j])) + perdidas * sum{(i,j) in arcos, t in Barcos} (if Y[i,j,t]<=0 then 0 else (
1/(Y[i,j,t]/capacidad[t]) * (valor_contenedor * Y[i,j,t]) * (Y[i,j,t]/ratio_contenedor[i] + Y[i,j,t]/ratio_contenedor[j]))));

subject to

Balance_llenos {i in Puertos: sum{(i,j) in arcos, t in Barcos} (X[i,j,t] - X[j,i,t]) = Q[i];
Balance_vacios {i in Puertos: sum{(i,j) in arcos, t in Barcos} (Y[i,j,t] - Y[j,i,t]) = -Q[i];
Balance_valor {i in Puertos: sum{(i,j) in arcos, t in Barcos} (XV[i,j,t] - XV[j,i,t]) = -Q_valor[i];
# las mercancías de importación y exportación se deben cumplir. Si es 0, se trata de un hub de tránsito
Logica {(i,j) in arcos, t in Barcos: XV[i,j,t] <= X[i,j,t]*10000000;
Fijo1 {(i,j) in arcos, t in Barcos: X[i,j,t] <= decision[i,j,t]*sum {k in {'Arg', 'Uru', 'Bra'}} Q[k];
Fijo2 {(i,j) in arcos, t in Barcos: Y[i,j,t] <= decision[i,j,t]*sum {k in {'Arg', 'Uru', 'Bra'}} Q[k];

```

Figura 2: Ejemplo de modelo en lenguaje AMPL (continuación)

El segundo archivo será el archivo de los datos y tendrá la extensión .dat. En este archivo se detallaran los valores exacto de los datos del problema que queremos resolver, incluido los sets, de puertos, rutas, barcos, etc. Al cambiar de problema, si sigue la misma estructura, este será el archivo que debemos modificar. Además, se necesitará variar los datos de los parámetros decisión para obtener las distintas soluciones para los distintos escenarios. También se pueden variar los costos asociados para crear soluciones próximas y hacer poder hacer frente a posibles cambios en los costos y materiales a transportar. Estos cambios, por otro lado, son bastantes frecuentes debido a muchas variables económicas, políticas, ambientales, etc. por ello es altamente recomendable la variación de los datos. Un ejemplo de archivo de datos, más concretamente el utilizado para resolver nuestro problema, es el siguiente:

```
# Set y parámetros de Puertos
set Puertos := Arg Uru Bra EU Can Ang Cam Mar Sen;

param: tasa_contenedor ratio_contenedor tiempo Q Q_valor:=
Bra 15.07 1920 0.04166 122233 968415.3
Arg 15.07 1920 0.04166 76930 509767.17
Uru 15.07 1920 0.04166 4726 36710.95
EU 7.75 1920 0.04166 0 0
Can 10.075 2496 0.04166 0 0
Ang 30 1920 0.04166 -25338 -409399.43
Cam 30 1920 0.04166 -6563 -47824.85
Mar 30 1920 0.04166 -150177 -876240.07
Sen 30 1920 0.04166 -21811 -181429.07;

# Set y parámetros de Barcos
set Barcos:= SA SB SC SE;

param: capacidad velocidad costo_diario fuel_km:=
SA 1164 722.273 21289 21.967
SB 1810 811.109 21940 24.96
SC 2728 791.797 22865 33.49
#SD 3428 799.522 23571 39.138
SE 4211 965.606 24360 37.931;
#SF 5652 965.606 25813 48.102;

# parametros de barcos y puertos
param fuel_puerto: Arg Uru Bra EU Can Ang Cam Mar Sen:=
SA 68.23 68.23 68.23 68.23 68.23 68.23 68.23 68.23
SB 77.62 77.62 77.62 77.62 77.62 77.62 77.62 77.62
SC 104.05 104.05 104.05 104.05 104.05 104.05 104.05 104.05
#SD 121.59 121.59 121.59 121.59 121.59 121.59 121.59 121.59
SE 117.84 117.84 117.84 117.84 117.84 117.84 117.84 117.84;
#SF 149.44 149.44 149.44 149.44 149.44 149.44 149.44 149.44;

param tasa_fija: Arg Uru Bra EU Can Ang Cam Mar Sen:=
SA 8500 8500 8500 8500 8500 12000 12000 12000
SB 8670 8670 8670 8670 8670 12240 12240 12240
SC 8843.4 8843.4 8843.4 8843.4 8843.4 12484.8 12484.8 12484.8
#SD 9020.26 9020.26 9020.26 9020.26 9020.26 12734.4 12734.4 12734.4
SE 9200.67 9200.67 9200.67 9200.67 9200.67 12989.1 12989.1 12989.1;
#SF 9384.69 9384.69 9384.69 9384.69 9384.69 13248.9 13248.9 13248.9;

param tasa_variable: Arg Uru Bra EU Can Ang Cam Mar Sen:=
SA 1611.44 1611.44 1611.44 5393.04 7765.98 8000 8000 8000
SB 2428.76 2428.76 2428.76 8386.09 12075.9 11200 11200 11200
SC 3590.21 3590.21 3590.21 12639.4 18200.6 15680 15680 15680
#SD 4475.85 4475.85 4475.85 15882.6 22870.9 21952 21952 21952
SE 5466.5 5466.5 5466.5 19510.4 28094.9 30732.8 30732.8 30732.8;
#SF 7289.6 7289.6 7289.6 26186.8 37709.1 43025.9 43025.9 43025.9;
```

Figura 3: Ejemplo de archivo de datos en lenguaje AMPL

```

# Otros parametros

param perdidas:= 0.15;
param temporada:= 365;
param valor_contenedor:= 1500;
param porcentaje:= 1;
param: arcos:          distancia:=
    Arg Bra          1900,   Bra Arg          1858
    Uru Bra          1648.5, Bra Uru          2200
    Arg Uru          210.91, Uru Arg          210.91
    Bra EU           6827.4, EU Bra           6827.4
    Bra Can          5571.2, Can Bra          5571.2
    EU Ang           6822.4, Ang EU           6822.4
    EU Cam           6250.2, Cam EU           6250.2
    EU Mar           44.677, Mar EU           44.677
    EU Sen           2481.5, Sen EU           2481.5
    Can Ang          4468,   Ang Can          4468
    Can Cam          4755.1, Cam Can          4755.1
    Can Mar          1080.1, Mar Can          1080.1
    Can Sen          1329.4, Sen Can          1329.4
    EU Can           1300.1 Can EU           1300.1;

param decision:=
    [Arg,*,*]:      SA      SB      SC              SE      :=
        Bra      0      1      0              1
        Uru      0      1      0              1
    [Uru,*,*]:      SA      SB      SC              SE      :=
        Bra      0      1      0              1
        Arg      0      1      0              1
    [Bra,*,*]:      SA      SB      SC              SE      :=
        EU      0      0      0              0
        Can      0      0      0              1
        Arg      0      1      0              1
        Uru      0      1      0              1
    [EU,*,*]:      SA      SB      SC              SE      :=
        Bra      0      0      0              1
        Can      1      1      1              1
        Ang      0      0      0              0
        Cam      0      0      0              0
        Mar      0      0      0              0
        Sen      0      0      0              0
    [Can,*,*]:      SA      SB      SC              SE      :=
        Bra      0      1      0              1
        EU      0      0      0              0
        Ang      1      1      1              1
        Cam      1      1      1              1
        Mar      1      1      1              1
        Sen      1      1      1              1
    [Ang,*,*]:      SA      SB      SC              SE      :=
        EU      0      0      0              0
        Can      1      1      1              1
    [Cam,*,*]:      SA      SB      SC              SE      :=
        EU      0      0      0              0
        Can      1      1      1              1
    [Mar,*,*]:      SA      SB      SC              SE      :=
        EU      0      0      0              0
        Can      1      1      1              1
    [Sen,*,*]:      SA      SB      SC              SE      :=
        EU      0      0      0              0
        Can      1      1      1              1;

```

Figura 4: Ejemplo de archivo de datos en lenguaje AMPL (continuación)

El tercer archivo será el archivo ejecución y tendrá extensión .run. Dicho archivo se puede ver como un ejecutable. En él se ordenará al solver para que cargue los dos archivos anteriores de modelo y datos y resuelva el problema. Una vez indicado esto, se ordenará a mostrar los resultados. Estos resultados serán escritos en el cuarto archivo, llamado solución y que tendrá la extensión .sol o .txt. En este archivo se guardarán las soluciones para nuestras variables, las frecuencias y algunos datos como los costos totales y parciales utilizando economía de escala. El archivo solución, al tratarse de un archivo de texto plano, será fácilmente importable en otro programa de edición de texto u hoja de cálculo si se quiere seguir trabajando con los resultados obtenidos. Es más, es recomendable ir importando las soluciones obtenidas tras las diversas iteraciones de escenarios ya que, a no ser que cambiemos el archivo ejecución, los datos se irán sobrescribiendo. Un ejemplo de archivo ejecución se muestra en la figura 5, para la solución lo mostraremos directamente en tablas.

### 3.1. Parámetro decisión

Es recomendable, aunque no estrictamente necesario, conocer el funcionamiento del procedimiento y el algoritmo que sigue el resolutor usado para entender las posibles soluciones y las necesidades de la creación de escenarios. Por ello se detalla aquí la función del parámetro llamado decisión.

Este parámetro se trata de un parámetro binario que depende de 3 índices, los índices  $i$  y  $j$  para referirse a puertos y el índice  $t$  para referirse al tipo de barco referido. Cuando el valor del parámetro es 1, permite el uso del barco tipo  $t$  a lo largo del arco  $(i,j)$ . Cuando el valor es 0, este uso no está permitido. Cuando existe más de un barco permitido para una ruta específica, el solver tenderá a utilizar el mejor barco posible.

Cuanto menos parámetros fijemos en 1, mayor facilidad para el solver de resolver el problema, aunque los puertos deberán estar siempre conectados para poder satisfacer las demandas.

```

model modelo.mod;
data modelo.dat;
option omit_zero_rows 1;
solve;

display cost > modelo2.sol;
display X > modelo2.sol;
display Y > modelo2.sol;
display XV > modelo2.sol;

printf "La frecuencia de las rutas de contenedores llenos es: \n" > modelo2.sol;
display{(i,j) in arcos, t in Barcos} X[i,j,t]/capacidad[t] > modelo2.sol;
printf "La frecuencia de las rutas de contenedores vacíos es:\n" > modelo2.sol;
display{(i,j) in arcos, t in Barcos} Y[i,j,t]/capacidad[t] > modelo2.sol;

printf "El costo de navegación para cada ruta es: \n" > modelo2.sol;
display{(i,j) in arcos} if (sum{ t in Barcos} (X[i,j,t] + Y[i,j,t])=0) then 0 else ((sum{ t in Barcos} (X[i,j,t]/capacidad[t] * (tasa_fija
[t,i] + costo_diario[t]*tiempo[i] + fuel_puerto[t,i] + distancia[i,j] * (costo_diario[t]/velocidad[t] + sum{ t in Barcos} (Y[
i,j,t]/capacidad[t] * (tasa_fija[t,i] + costo_diario[t]*tiempo[i] + fuel_puerto[t,i] + distancia[i,j] * (costo_diario[t]/velocidad[t] +
fuel_km[t])))) + sum{ t in Barcos} ((tasa_contenedor[i] + tasa_contenedor[j] + tasa_contenedor[j]) * X[i,j,t]) + sum{ t in Barcos} ((
ratio_contenedor[j] + costo_diario[t]/ratio_contenedor[i] + costo_diario[t]/ratio_contenedor[j]) * X[i,j,t]) + sum{ t in Barcos} ((
tasa_contenedor[i] + tasa_contenedor[j] + tasa_variable[t,i]/ratio_contenedor[i] + tasa_variable[t,j]/ratio_contenedor[j] + costo_diario[t]
/ratio_contenedor[i] + costo_diario[t]/ratio_contenedor[j]) * Y[i,j,t]) ) / (sum{ t in Barcos} (X[i,j,t] + Y[i,j,t])))) > modelo2.sol;

printf "El costo de inventario para cada ruta es: \n" > modelo2.sol;
display{(i,j) in arcos} if (sum{ t in Barcos} (X[i,j,t] + Y[i,j,t])=0) then 0 else ((temporada*perdidas/2 * sum{ t in Barcos } (if
X[i,j,t]=0 then 0 else (1/(X[i,j,t]/capacidad[t]) * XV[i,j,t])) + temporada*perdidas/2 * sum{ t in Barcos } (if Y[i,j,t]=0 then 0 else (1/(
Y[i,j,t]/capacidad[t]) * valor_contenedor*Y[i,j,t])) + perdidas *sum{ t in Barcos} (XV[i,j,t] + valor_contenedor * X[i,j,t]) * (tiempo[i] +
tiempo[j] + distancia[i,j]/velocidad[t])) + perdidas *sum{ t in Barcos} (valor_contenedor * Y[i,j,t] * (tiempo[i] + tiempo[j] + distancia[i,
j]/velocidad[t])) + perdidas * sum{ t in Barcos} (if X[i,j,t]=0 then 0 else ((1/X[i,j,t]/capacidad[t]) * (XV[i,j,t] + valor_contenedor *
X[i,j,t])) * (X[i,j,t]/ratio_contenedor[i] + X[i,j,t]/ratio_contenedor[j])) + perdidas * sum{ t in Barcos} (if Y[i,j,t]=0 then 0
else ((1/Y[i,j,t]/capacidad[t]) * (valor_contenedor * Y[i,j,t]) * (Y[i,j,t]/ratio_contenedor[j])))) / (sum{ t in
Barcos} (X[i,j,t] + Y[i,j,t])))) > modelo2.sol;

```

Figura 5: Ejemplo de archivo ejecución en lenguaje AMPL



## 4. Análisis de HUBs alternativos en flujo de mercancías para tráficos entre Sudamérica y África occidental

### 4.1. Datos

Los datos para la resolución del programa los hemos obtenido de diferentes fuentes. Todos ellos serán detallados a continuación en las siguientes páginas. Las rutas elegidas no representan todos los puertos que especifican los datos pero si las mas importantes, la conexión al resto de puertos se puede establecer de manera significativamente óptima mediante rutas feeder desde los puertos mayores hacia los de menos volumen de contenedores, tanto de exportación como de importación. Se han considerado 4 clases distintas de barcos que pueden efectuar las rutas, llamados SA, SB, SC y SE.

#### 4.1.1. Rutas

Los países elegidos como importantes de acuerdo con los datos aportados mas adelante son: Argentina, Brasil y Uruguay como representaron de países exportadores de Sudamérica, Angola, Camerún, Marruecos y Senegal como países importadores de África occidental y Canarias y Algeciras como puertos de transito o Hub. Tosa las posibles conexiones que hemos creado son:

*Argentina ↔ Brasil*

*Argentina ↔ Uruguay*

*Uruguay ↔ Brasil*

*Europa(Algeciras) ↔ Brasil*

*Canarias ↔ Brasil*

*Europa(Algeciras) ↔ Angola*

*Europa(Algeciras) ↔ Camerun*

*Europa(Algeciras) ↔ Senegal*

*Europa(Algeciras) ↔ Marruecos*

*Canarias ↔ Angola*

*Canarias ↔ Camerun*

*Canarias ↔ Senegal*

*Canarias ↔ Marruecos*

Siendo la representación gráfica la siguiente:

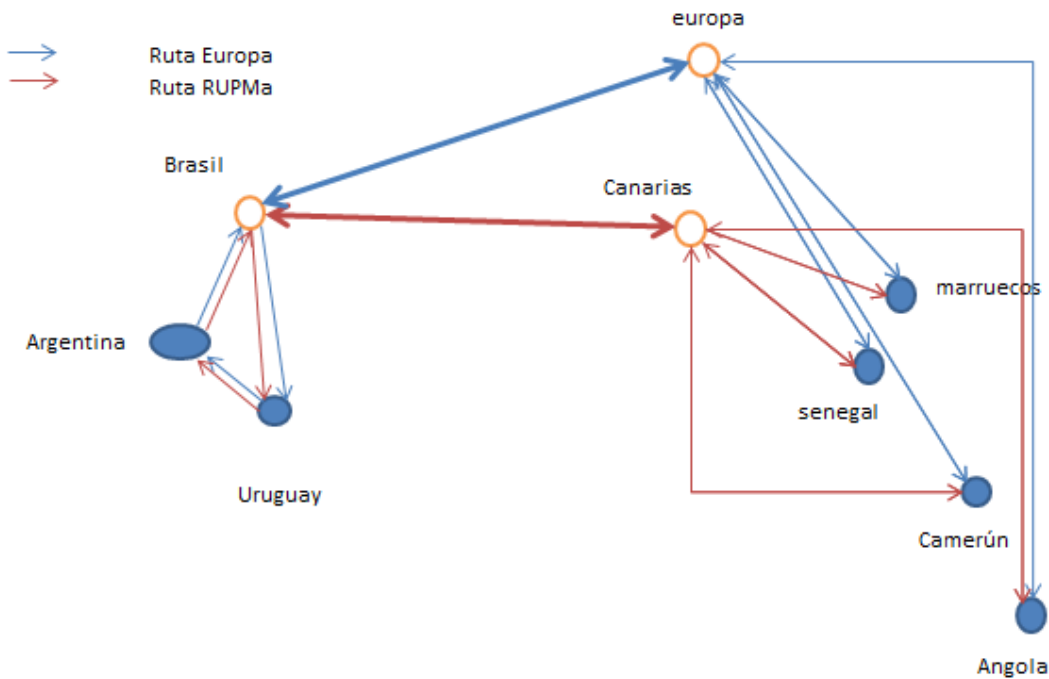


Figura 6: Esquema de las posibles rutas

#### 4.1.2. Datos de puertos

Los datos correspondientes a tasas portuarias (fijas y variables), tiempos de atraque y ratio de manejo de contenedores se han obtenido de varias fuentes como la página web [www.tasasportuarias.com](http://www.tasasportuarias.com). Además se han supuesto los puertos africanos más caros por experiencia y los puertos americanos con características similares. Los datos para los puertos son:

| Puertos   | G (€/TEU) | R (diario) | W (días) |
|-----------|-----------|------------|----------|
| Argentina | 15.07     | 1920       | 0.04     |
| Uruguay   | 15.07     | 1920       | 0.04     |
| Brasil    | 15.07     | 1920       | 0.04     |
| Europa    | 7.75      | 1920       | 0.04     |
| Canarias  | 10.075    | 2496       | 0.03     |
| Angola    | 30        | 1920       | 0.04     |
| Camerún   | 30        | 1920       | 0.04     |
| Marruecos | 30        | 1920       | 0.04     |
| Senegal   | 30        | 1920       | 0.04     |

Cuadro 2: Datos de puertos. Datos generales

| $\alpha$  |       |       |         |           |
|-----------|-------|-------|---------|-----------|
|           | SA    | SB    | SC      | SD        |
| Argentina | 8500  | 8670  | 8843.4  | 9200.6734 |
| Uruguay   | 8500  | 8670  | 8843.4  | 9200.6734 |
| Brasil    | 8500  | 8670  | 8843.4  | 9200.6734 |
| Europa    | 8500  | 8670  | 8843.4  | 9200.6734 |
| Canarias  | 8500  | 8670  | 8843.4  | 9200.6734 |
| Angola    | 12000 | 12240 | 12484.8 | 12989.186 |
| Camerún   | 12000 | 12240 | 12484.8 | 12989.186 |
| Marruecos | 12000 | 12240 | 12484.8 | 12989.186 |
| Senegal   | 12000 | 12240 | 12484.8 | 12989.186 |

Cuadro 3: Datos de puertos. Tasas fijas

| $\beta$   |           |          |            |          |
|-----------|-----------|----------|------------|----------|
|           | SA        | SB       | SC         | SD       |
| Argentina | 1611.4428 | 2428.762 | 3590.2156  | 5466.507 |
| Uruguay   | 1611.4428 | 2428.762 | 3590.2156  | 5466.507 |
| Brasil    | 1611.4428 | 2428.762 | 3590.2156  | 5466.507 |
| Europa    | 5393.0448 | 8386.092 | 12639.3639 | 19510.41 |
| Canarias  | 7765.98   | 12075.97 | 18200.69   | 28094.98 |
| Angola    | 8000      | 11200    | 15680      | 30732.8  |
| Camerún   | 8000      | 11200    | 15680      | 30732.8  |
| Marruecos | 8000      | 11200    | 15680      | 30732.8  |
| Senegal   | 8000      | 11200    | 15680      | 30732.8  |

Cuadro 4: Datos de puertos. Tasas variables

#### 4.1.3. Datos de Barcos

En lo referente a los datos necesarios sobre las características de los barcos, como son, la velocidad, capacidad, costo de fuel y operativo hemos contado con los siguientes datos. En este caso, se presume el costo de fuel en puerto constante para el índice puerto.

| <b>barcos</b> | SA      | SB      | SC      | SD      |
|---------------|---------|---------|---------|---------|
| U             | 1164    | 1810    | 2728    | 4211    |
| V             | 722.273 | 811.109 | 791.797 | 965.606 |
| O             | 21289   | 21940   | 22865   | 24360   |
| F             | 21.966  | 24.96   | 33.48   | 37.93   |
| F puerto      | 68.23   | 77.62   | 104.05  | 117.84  |

Cuadro 5: Datos de Barcos.

#### 4.1.4. Datos de distancias

Las distancias han sido obtenidas simplemente usando Google earth y utilizando los puertos principales de cada región, es decir, Buenos aires, Montevideo, Río de Janeiro, Las Palmas de G.C., Algeciras, Tánger, .... Dichas distancias son:

| <b>Puertos</b> | Arg    | Uru    | Bra    | Eur    | Can    | Ang    | Cam    | Mar    | Sen    |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Arg            |        | 176,36 | 1858   |        |        |        |        |        |        |
| Uru            | 176,36 |        | 1648,5 |        |        |        |        |        |        |
| Bra            | 1858   | 1648,5 |        | 6827,4 | 5571,2 |        |        |        |        |
| Eur            |        |        | 6827,4 |        |        | 6822,4 | 6250,2 | 44,677 | 2481,5 |
| Can            |        |        | 5571,2 |        |        | 4468   | 4755,1 | 1080,1 | 1329,4 |
| Ang            |        |        |        | 6822,4 | 4468   |        |        |        |        |
| Cam            |        |        |        | 6250,2 | 4755,1 |        |        |        |        |
| Mar            |        |        |        | 44,677 | 1080,1 |        |        |        |        |
| Sen            |        |        |        | 2481,5 | 1329,4 |        |        |        |        |

Cuadro 6: Datos de Distancias.

#### 4.1.5. Datos de importación y exportación

Los datos de importación y exportación fueron dados en miles de euros y, tras aplicar unas tasas de conversión a kilos y, posteriormente, suponiendo que un TEU puede transportar 22 toneladas, llegamos a las siguientes conclusiones:

| <b>Puertos</b> | Exporta/Importa(+/- TEUS) | Exporta/Importa (+/- Miles de €) |
|----------------|---------------------------|----------------------------------|
| Argentina      | 76930,9158076464          | 509767,17                        |
| Uruguay        | 4726,1386753278           | 36710,95                         |
| Brasil         | 122233,641422513          | 968415,3                         |
| Europa         | 0                         | 0                                |
| Canarias       | 0                         | 0                                |
| Angola         | -25338,4876730152         | -409399,43                       |
| Camerún        | -6563,5501309522          | -47824,85                        |
| Marruecos      | -150177,700192425         | -876240,07                       |
| Senegal        | -21810,9579090951         | -181429,07                       |

Cuadro 7: Datos de Importaciones y exportaciones.

## 4.2. Solución Óptima

Como ya se ha mencionado, para hallar la solución óptima se precisará de la creación de diversos escenarios que ayuden al solver que utilizemos a encontrar la solución óptima o al menos de una manera heurística. Este hecho, como ya se ha explicado, es debido a que la función objetivo es de naturaleza no lineal, y los solvers disponibles de manera gratuita sólo encuentran el óptimo global, tras una iteración del programa creado, si la función a optimizar es convexa, lo cual no es nuestro caso.

Para conocer cual es la mejor estrategia entre las posibles estrategias que hemos seleccionado, simplemente compararemos los costos finales totales o los costos parciales asociados. Para dichas comparaciones, lo mas útil es importar los datos que vamos obteniendo en una hoja de calculo de excel, Calc (Open office) o similares. Estas importaciones se podrían realizar de manera automática si se poseyeran los conocimientos necesarios para crear un macro en excel y asociarlos a un programa en c++ como mencionamos previamente.

El procedimiento en el que nos hemos basado para ir creando los escenarios posibles sigue completamente un planteamiento lógico. El primer paso será resolver el problema sin restricciones extras, es decir, estableciendo todos los parámetros binarios de decisión igual a 1. Posteriormente se intentará eliminar las rutas que se consideren ilógicas, como aquellas que conecten puertos africanos entre sí. A continuación en cada escenario se detallarán las razones para su elección.

#### 4.2.1. Escenario 1. Problema relajado

En primer lugar ejecutamos el problema relajado, es decir, sin restricciones que condicionen. Como mencionamos antes se hará mediante el establecimiento del valor 1 a todos los parámetros decisión. Esta solución nos dará una primera cota superior a la solución óptima que, probablemente sea muy mala, es decir, se encuentre muy alejada de la solución óptima real.

Tras ejecutar el procedimiento, el programa nos devuelve la siguiente solución, resultando óptimo el paso por Europa aunque para el caso de los contenedores vacíos la optimalidad resulta de varios trasbordos:

costo total: = 2404140000 €

| Tráfico de contenedores llenos   |               |          |              |
|----------------------------------|---------------|----------|--------------|
| Ruta                             | Tipo de barco | Cantidad | Nº de viajes |
| Arg Bra                          | SA            | 76930    | 66.0911      |
| Bra EU                           | SA            | 203889   | 175.162      |
| EU Ang                           | SA            | 25338    | 21.768       |
| EU Cam                           | SA            | 6563     | 5.63832      |
| EU Mar                           | SA            | 150177   | 129.018      |
| EU Sen                           | SA            | 21811    | 18.738       |
| Uru Bra                          | SA            | 4726     | 4.06014      |
| Tráfico de contenedores vacíos   |               |          |              |
| Ruta                             | Tipo de barco | Cantidad | Nº de viajes |
| Ang Can                          | SA            | 203889   | 175.162      |
| Bra Arg                          | SA            | 76930    | 660.911      |
| Bra Uru                          | SA            | 4726     | 406.014      |
| Cam EU                           | SA            | 6563     | 563.832      |
| Can Bra                          | SA            | 203889   | 175.162      |
| EU Ang                           | SA            | 178551   | 153.394      |
| Mar EU                           | SA            | 150177   | 129.018      |
| Sen EU                           | SA            | 21811    | 18.738       |
| Tráfico de valor de la mercancía |               |          |              |
| Ruta                             | Tipo de barco | Cantidad |              |
| Arg Bra                          | SA            | 509767   |              |
| Bra EU                           | SA            | 1514890  |              |
| EU Ang                           | SA            | 409399   |              |
| EU Cam                           | SA            | 47824.8  |              |
| EU Mar                           | SA            | 876240   |              |
| EU Sen                           | SA            | 181429   |              |
| Uru Bra                          | SA            | 36710.9  |              |

Cuadro 8: Solución 1

#### 4.2.2. Escenario 2.

En segundo lugar, introducimos la restricción que obligue a usar barcos tipo E (el más grande), debido a la consolidación de cargo en dicha ruta, tanto para contenedores llenos como vacíos. La solución obtenida en este caso sigue lejos de la óptima.

Tras ejecutar el procedimiento, el programa nos devuelve la siguiente solución, resultando óptimo el paso por Europa aunque para el caso de los contenedores vacíos la optimalidad resulta de varios trasbordos:

costo total: = 2255710000 €

| Trafico de contenedores llenos   |               |          |              |
|----------------------------------|---------------|----------|--------------|
| Ruta                             | Tipo de barco | Cantidad | Nº de viajes |
| Arg Bra                          | SA            | 76930    | 66.0911      |
| Bra EU                           | SE            | 203889   | 48.41        |
| EU Ang                           | SA            | 25338    | 21.768       |
| EU Cam                           | SA            | 6563     | 5.63832      |
| EU Mar                           | SA            | 150177   | 129.018      |
| EU Sen                           | SA            | 21811    | 18.738       |
| Uru Bra                          | SA            | 4726     | 4.06014      |
| Trafico de contenedores vacíos   |               |          |              |
| Ruta                             | Tipo de barco | Cantidad | Nº de viajes |
| Ang Can                          | SA            | 203889   | 175.162      |
| Bra Arg                          | SA            | 76930    | 66.0911      |
| Bra Uru                          | SA            | 4726     | 4.06014      |
| Cam EU                           | SA            | 6563     | 5.63832      |
| Can Bra                          | SA            | 203889   | 175.162      |
| EU Ang                           | SA            | 178551   | 153.394      |
| Mar EU                           | SA            | 150177   | 129.018      |
| Sen EU                           | SA            | 21811    | 18.738       |
| Trafico de valor de la mercancía |               |          |              |
| Ruta                             | Tipo de barco | Cantidad |              |
| Arg Bra                          | SA            | 509767   |              |
| Bra EU                           | SE            | 1514890  |              |
| EU Ang                           | SA            | 409399   |              |
| EU Cam                           | SA            | 47824.8  |              |
| EU Mar                           | SA            | 876240   |              |
| EU Sen                           | SA            | 181429   |              |
| Uru Bra                          | SA            | 36710.9  |              |

Cuadro 9: Solución 2

### 4.2.3. Escenario 3.

Para el siguiente cambio es necesario mirar las soluciones obtenidas hasta el momento. Es fácil ver que la ruta Camerún - Europa para contenedores vacíos para luego llevarlos de Europa a Angola y posteriormente a Canarias no es muy lógica, por ello, le quitaremos esa posibilidad. Para ello diremos que no se puede utilizar la ruta Europa-angola. En este caso lo restringimos mediante la adición de una nueva restricción y no de los respectivos 0, para no impedir el caso general.

Tras ejecutar el procedimiento, el programa nos devuelve la siguiente solución, resultando óptimo el paso por Europa aunque para el caso de los contenedores vacíos la optimalidad resulta de varios trasbordos:

costo total: = 2332410000 €

| Tráfico de contenedores llenos   |               |          |              |
|----------------------------------|---------------|----------|--------------|
| Ruta                             | Tipo de barco | Cantidad | Nº de viajes |
| Arg Bra                          | SA            | 76930    | 66.0911      |
| Bra EU                           | SE            | 203889   | 48.41        |
| EU Ang                           | SA            | 25338    | 21.768       |
| EU Cam                           | SA            | 6563     | 5.63832      |
| EU Mar                           | SA            | 150177   | 129.018      |
| EU Sen                           | SA            | 21811    | 18.738       |
| Uru Bra                          | SA            | 4726     | 4.06014      |
| Tráfico de contenedores vacíos   |               |          |              |
| Ruta                             | Tipo de barco | Cantidad | Nº de viajes |
| Ang EU                           | SA            | 25338    | 21.768       |
| Bra Arg                          | SA            | 76930    | 660.911      |
| Bra Uru                          | SA            | 4726     | 406.014      |
| Cam Can                          | SA            | 203889   | 175.162      |
| Can Bra                          | SA            | 203889   | 175.162      |
| EU Cam                           | SA            | 197326   | 169.524      |
| Mar EU                           | SA            | 150177   | 129.018      |
| Sen EU                           | SA            | 21811    | 18.738       |
| Tráfico de valor de la mercancía |               |          |              |
| Ruta                             | Tipo de barco | Cantidad |              |
| Arg Bra                          | SA            | 509767   |              |
| Bra EU                           | SE            | 1514890  |              |
| EU Ang                           | SA            | 409399   |              |
| EU Cam                           | SA            | 47824.8  |              |
| EU Mar                           | SA            | 876240   |              |
| EU Sen                           | SA            | 181429   |              |
| Uru Bra                          | SA            | 36710.9  |              |

Cuadro 10: Solución 3



#### 4.2.4. Escenario 4.

Nos volvemos a encontrar con el mismo problema anterior, así que prohibimos todas las conexiones desde Europa hasta países africanos mediante la modificación de las restricciones.

Tras ejecutar el procedimiento, el programa nos devuelve la siguiente solución, resultando óptimo el paso por Europa tanto para ir como para volver:

costo total: = 1890450000 €

| Tráfico de contenedores llenos   |               |          |              |
|----------------------------------|---------------|----------|--------------|
| Ruta                             | Tipo de barco | Cantidad | Nº de viajes |
| Arg Bra                          | SA            | 76930    | 66.0911      |
| Bra EU                           | SA            | 203889   | 175.162      |
| EU Ang                           | SA            | 25338    | 21.768       |
| EU Cam                           | SA            | 6563     | 5.63832      |
| EU Mar                           | SA            | 150177   | 129.018      |
| EU Sen                           | SA            | 21811    | 18.738       |
| Uru Bra                          | SA            | 4726     | 406.014      |
| Tráfico de contenedores vacíos   |               |          |              |
| Ruta                             | Tipo de barco | Cantidad | Nº de viajes |
| Ang EU                           | SA            | 25338    | 21.768       |
| Bra Arg                          | SA            | 76930    | 66.0911      |
| Bra Uru                          | SA            | 4726     | 4.06014      |
| EU Bra                           | SA            | 203889   | 175.162      |
| Cam EU                           | SA            | 6563     | 5.63832      |
| Mar EU                           | SA            | 150177   | 129.018      |
| Sen EU                           | SA            | 21811    | 18.738       |
| Tráfico de valor de la mercancía |               |          |              |
| Ruta                             | Tipo de barco | Cantidad |              |
| Arg Bra                          | SA            | 509767   |              |
| Bra EU                           | SA            | 1514890  |              |
| EU Ang                           | SA            | 409399   |              |
| EU Cam                           | SA            | 47824.8  |              |
| EU Mar                           | SA            | 876240   |              |
| EU Sen                           | SA            | 181429   |              |
| Uru Bra                          | SA            | 36710.9  |              |

Cuadro 11: Solución 4

#### 4.2.5. Escenario 5.

El siguiente paso consiste en reducir el número de viajes para las rutas que tengan un número muy alto de viajes. Para ello no permitimos el uso de barcos pequeños en dichas rutas mediante la asignación de 0 en el parámetro decisión de los barcos que no queremos usar en las rutas propuestas. También nos hemos basado en otro procedimiento diferente el cual utiliza la optimalidad de Pareto para guiarnos en cuál debería ser el tipo de barco óptimo.

Tras ejecutar el procedimiento, el programa nos devuelve la siguiente solución, resultando óptimo el paso por Europa tanto para ir como para volver. Podemos decir que esta es la mejor distribución si obligamos a pasar por Europa.

costo total: = 1756470000 €

| Tráfico de contenedores llenos   |               |          |              |
|----------------------------------|---------------|----------|--------------|
| Ruta                             | Tipo de barco | Cantidad | Nº de viajes |
| Arg Bra                          | SB            | 76930    | 42.5028      |
| Bra EU                           | SE            | 203889   | 48.41        |
| EU Ang                           | SA            | 25338    | 21.768       |
| EU Cam                           | SA            | 6563     | 5.63832      |
| EU Mar                           | SA            | 150177   | 129.018      |
| EU Sen                           | SA            | 21811    | 18.738       |
| Uru Bra                          | SB            | 4726     | 2.61105      |
| Tráfico de contenedores vacíos   |               |          |              |
| Ruta                             | Tipo de barco | Cantidad | Nº de viajes |
| Ang EU                           | SA            | 25338    | 21.768       |
| Bra Arg                          | SB            | 76930    | 425.068      |
| Bra Uru                          | SB            | 4726     | 261.105      |
| EU Bra                           | SE            | 203889   | 175.162      |
| Cam EU                           | SA            | 6563     | 563.832      |
| Mar EU                           | SA            | 150177   | 129.018      |
| Sen EU                           | SA            | 21811    | 18.738       |
| Tráfico de valor de la mercancía |               |          |              |
| Ruta                             | Tipo de barco | Cantidad |              |
| Arg Bra                          | SB            | 509767   |              |
| Bra EU                           | SE            | 1514890  |              |
| EU Ang                           | SA            | 409399   |              |
| EU Cam                           | SA            | 47824.8  |              |
| EU Mar                           | SA            | 876240   |              |
| EU Sen                           | SA            | 181429   |              |
| Uru Bra                          | SB            | 36710.9  |              |

Cuadro 12: Solución 5

#### 4.2.6. Escenario 6.

Ahora forzaremos a el procedimiento a que calcule las rutas pasando por Canarias la ida tambien. Si resulta que el resultado es por lo general mejor que por Europa., seguiremos variando los parámetros para encontrar la mejor solución por Canarias. Cabe destacar que en este primer resultado, no hemos forzado el uso de ningún tipo de barco en concreto.

Tras ejecutar el procedimiento, el programa nos devuelve la siguiente solución.

costo total: = 1578240000 €

| Trafico de contenedores llenos   |               |          |              |
|----------------------------------|---------------|----------|--------------|
| Ruta                             | Tipo de barco | Cantidad | Nº de viajes |
| Arg Bra                          | SA            | 76930    | 66.14        |
| Bra Can                          | SA            | 203889   | 175.162      |
| Can Ang                          | SA            | 25338    | 21.768       |
| Can Cam                          | SA            | 6563     | 5.63832      |
| Can Mar                          | SA            | 150177   | 129.018      |
| Can Sen                          | SA            | 21811    | 18.738       |
| Uru Bra                          | SA            | 4726     | 4.16         |
| Trafico de contenedores vacíos   |               |          |              |
| Ruta                             | Tipo de barco | Cantidad | Nº de viajes |
| Ang Can                          | SA            | 25338    | 21.768       |
| Bra Arg                          | SA            | 76930    | 66.14        |
| Bra Uru                          | SA            | 4726     | 4.16         |
| Can Bra                          | SA            | 203889   | 175.162      |
| Cam Can                          | SA            | 6563     | 563.832      |
| Mar Can                          | SA            | 150177   | 129.018      |
| Sen Can                          | SA            | 21811    | 18.738       |
| Trafico de valor de la mercancía |               |          |              |
| Ruta                             | Tipo de barco | Cantidad |              |
| Arg Bra                          | SA            | 509767   |              |
| Bra Can                          | SA            | 1514890  |              |
| Can Ang                          | SA            | 409399   |              |
| Can Cam                          | SA            | 47824.8  |              |
| Can Mar                          | SA            | 876240   |              |
| Can Sen                          | SA            | 181429   |              |
| Uru Bra                          | SA            | 36710.9  |              |

Cuadro 13: Solución 6

#### 4.2.7. Escenario 7. Óptimo heurístico

Al igual que hicimos antes, en este escenario se intenta reducir la frecuencia para conocer el barco óptimo. Para ello seguimos el mismo método de varianza de los parámetros decisión, asignando 1 en el barco que queremos usar y 0 en otro caso. Esta solución se convierte en la mejor solución encontrada.

costo total: = 1465630000 €

| Tráfico de contenedores llenos   |               |          |              |
|----------------------------------|---------------|----------|--------------|
| Ruta                             | Tipo de barco | Cantidad | Nº de viajes |
| Arg Bra                          | SB            | 76930    | 42.5028      |
| Bra Can                          | SE            | 203889   | 48.41        |
| Can Ang                          | SA            | 25338    | 21.768       |
| Can Cam                          | SA            | 6563     | 5.63832      |
| Can Mar                          | SA            | 150177   | 129.018      |
| Can Sen                          | SA            | 21811    | 18.738       |
| Uru Bra                          | SB            | 4726     | 2.61105      |
| Tráfico de contenedores vacíos   |               |          |              |
| Ruta                             | Tipo de barco | Cantidad | Nº de viajes |
| Ang Can                          | SA            | 25338    | 21.768       |
| Bra Arg                          | SB            | 76930    | 42.5068      |
| Bra Uru                          | SB            | 4726     | 2.61105      |
| Can Bra                          | SB            | 203889   | 112.646      |
| Cam Can                          | SA            | 6563     | 5.63832      |
| Mar Can                          | SA            | 150177   | 129.018      |
| Sen Can                          | SA            | 21811    | 18.738       |
| Tráfico de valor de la mercancía |               |          |              |
| Ruta                             | Tipo de barco | Cantidad |              |
| Arg Bra                          | SB            | 509767   |              |
| Bra Can                          | SE            | 1514890  |              |
| Can Ang                          | SA            | 409399   |              |
| Can Cam                          | SA            | 47824.8  |              |
| Can Mar                          | SA            | 876240   |              |
| Can Sen                          | SA            | 181429   |              |
| Uru Bra                          | SB            | 36710.9  |              |

Cuadro 14: Solución 7

## 5. Conclusiones

Se ha creado un procedimiento de obtención de óptimos locales de rutas de transporte marítimo. Este procedimiento se ha basado en otros existentes y en aportaciones nuevas. Este procedimiento se ha llevado a cabo para mostrar la optimalidad de Canarias como hub de tránsito entre Sudamérica y África occidental, pero se podría extrapolar para hallar óptimos en cualquier situación e incluso es posible utilizar este algoritmo en situaciones estocásticas.

A la hora de realizar la implementación informática se han usado softwares concretos pero se podría utilizar el procedimiento creado en otros softwares teniendo en cuenta el cambio de lenguaje pero manteniendo la traza, es decir, utilizando el procedimiento descrito en el apartado matemático-lógico. También cabe destacar que el software utilizado está abierto a el uso en un futuro del mismo como función en un programa en C++ y un posible autorun.

A continuación se procede a analizar los resultados obtenidos para nuestro problema concreto. Al obtener las soluciones para diversos escenarios podemos sacar varias conclusiones en claro. La primera es la asignación de la optimalidad de la ruta al pasar por Canarias, y no por Europa. tal y como se está haciendo actualmente. La diferencia entre la ruta óptima pasando por Europa y la misma pasando por Canarias es de 290840000 €, es decir, una mejora del 16.5 %. También cabe destacar que el uso de barcos de capacidad mayor no es siempre lo más óptimo. También se debe mencionar que, al ser las rutas realizadas solo por un tipo de barco, no es necesario optimizar con posterioridad la distribución de la carga entre los diferentes barcos, en cuyo caso sería una aplicación del conocido como problema de la mochila.

Por otro lado, se debe mencionar que este programa no tiene en cuenta demanda de Europa y Canarias, la cual cambiaría la solución, aunque probablemente el nuevo óptimo consistiría en el mismo actual más la inclusión de un flujo Brasil - Europa. Además, si se quiere dar una explicación a los resultados, podríamos decir que es debido a los altos costes de inventario debido a la gran cantidad de mercancía que se transporta.

Posibles estudios que se pueden hacer en un futuro basandonos en este son, entre otros, la inclusión de una demanda en Europa y Canarias. Además se podría obligar a conseguir un mínimo de flujo en una ruta determinada, es decir, obligar a usar una ruta y hallar el óptimo teniendo en cuenta el uso obligatorio de una determinada ruta o grupo de rutas.

## A. Guía de instalación y uso

En esta guía se explica cómo instalar el software necesario para llevar a cabo los procedimientos explicados en el artículo y poder ejecutar los mismos. El único programa necesario de instalar es el textpad 7.0, pero se necesita agregar una herramienta externa, llamada ampl. Más adelante se explicará cómo están estructurados los datos, así como los parámetros que se necesitan cambiar a lo largo del algoritmo para encontrar la mejor solución posible (Para más información sobre dichos parámetros se remite a la sección que habla del parámetro decisión).

Junto con este documento se incluye un CD que contiene el fichero de instalación con la versión de prueba del textpad 7, tanto para ordenadores que trabajan en 32 bit como ordenadores que trabajan en 64 bit. Además se incluye la herramienta mencionada así como otros ficheros que incluyen resolutores necesarios. Por otro lado, se encuentran los ficheros .mod, .dat, .run y .sol que se mencionaron y describieron a lo largo del artículo y que son necesarios para la ejecución del algoritmo. Además, se incluye un complemento al textpad, cuya instalación es opcional pero recomendable para resaltar la sintaxis de las hojas del textpad. Esta guía también está incluida en el cd junto con un ejemplo de comparación de escenarios en una hoja de cálculo en Excel.

### A.1. Instalación del Textpad y sus herramientas

Instalar el Textpad es muy sencillo, simplemente se ejecuta el fichero con el nombre textpad 7 de la versión deseada.

Para instalar la herramienta necesaria para ejecutar el programa primero tenemos que cerrar todos los documentos que tengamos abiertos dentro del textpad (sin cerrar, claro, el textpad). Dentro de la pestaña configuración entramos en la opción preferencias. Pinchamos en agregar... programa y buscamos el archivo ampl.exe incluido en el CD.

Si queremos resaltar la sintaxis del ampl (opcional) primero debemos mover el archivo ampl.syn a la carpeta donde se instaló el textpad y dentro de la carpeta system (por defecto la ruta será: *C : \ProgramFiles(x86)\TextPad7\system*). Posteriormente nos dirigimos a la pestaña configuración y pinchamos en “nueva clase de documento”. Aparecerá una nueva ventana que nos irá diciendo lo que debemos hacer.

- En nombre ponemos: ampl
- En miembros de la clase ponemos: \*.mod, \*.dat, \*.run, \*.sol
- En Sintaxis marcamos la caja “activar resultado de sintaxis” y seleccionamos ampl.syn de la lista desplegable.

## A.2. Cambiar datos

Tras abrir los 4 archivos llamados modelo en textpad, si queremos cambiar los datos del problema, tanto en lo referente a puertos en los que se va a realizar el estudio como a tipos de barcos o sus parámetros asociados (Nota: la licencia proporcionada es gratuita así que hay restricciones en el número de barcos y/o puertos que podemos añadir). La estructura de los datos se debe mantener, y es muy fácilmente entendible.

Cabe destacar el dato llamado decisión, compuesto por 0 y 1 que definen los escenarios de los que se habla en el informe. El objetivo del algoritmo es ir variando estos datos, obteniendo resultados mejores o peores al ya obtenido.

## A.3. Ejecutar

Para ejecutar el programa primero debemos situarnos en el fichero .run. Nos dirigimos hacia la pestaña herramientas y, dentro de la lista desplegable “herramientas externas”, ejecutamos ampl. Se actualizará el fichero .sol con la solución nueva. Debemos tener en cuenta que cada vez que ejecutemos se sobrescribirán los datos del archivo .sol, por lo cual debemos guardar las soluciones parciales en otro lugar como puede una hoja de cálculo en Excel como la que se adjunta en el disco.

Simplemente quedaría ejecutar el programa tantas veces como queramos, cambiando los datos del parámetro decisión.