

# Refinamiento de la planificación eco-eficiente de estiba en grandes buques porta-contenedores.

Adolfo Leon Canizales Murcia

Universidad del Valle  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería en Sistemas y Computación  
Cra 13 No. 100 - 00. Santiago de Cali, Colombia

6 de diciembre de 2013

## 1. Introducción

El informe presentado en éste documento tiene como función mostrar los avances realizados en los procesos de modelamiento, implementación y pruebas.

### 1.1. Buque-portacontenedores y contenedores

La optimización de procesos de estiba en los puertos costeros es un proceso complejo que implica encontrar una buena forma de organizar un conjunto de cajas metálicas, conocidas como contenedores, en un buque, buscando objetivos como la seguridad para que el barco pueda soportar los viajes en alta mar sin que este sufra daños o se hunda, y la rapidez para que se puedan cargar y descargar contenedores del buque en el menor tiempo posible.

Los contenedores son cajas de metal donde se puede almacenar muchos tipos de bienes. Cada contenedor tiene un ancho de 8 pies, un alto de 8.6 o 9.6 pies, un largo de 20, 40 o 45 pies y un puerto donde ha de ser descargado. Existen varios tipos de contenedores y éstos son ubicados en el barco dependiendo de un conjunto de reglas de separación. En el modelo que se ha implementado hasta ahora, solo se tienen en cuenta contenedores con ancho de 8 pies, alto de 8.6 o 9.6 pies, largo de 20 o 40 pies y contenedores que almacenan bienes que necesiten algún tipo de precaución especial.

Los buques porta-contenedores contienen espacios (bahías) en los que almacenan los contenedores. Las bahías se encuentran distribuidas en todo el barco, sobre y bajo cubierta separadas por tapas de escotilla a lo largo del buque. Éstas bahías se separan transversalmente en pilas que tienen el ancho de 8 pies, el largo de una 20, 40 o 45 pies. La pila se encuentra dividida en celdas que se encuentra organizadas verticalmente e indexadas por niveles. Cada celda se divide en 2 ranuras que separan la celda en popa y

proa. Adicionalmente, algunas ranuras de las celdas posee un enchufe que proporciona energía eléctrica a contenedores que necesitan refrigeración.

Para gestionar con más facilidad los contenedores de 40 pies en el modelo propuesto en éste informe; se han dividido en 2 contenedores de 20 pies, que irán ubicados en la proa y la popa de la misma celda. Además, las bahías en el buque son indexadas de popa a proa y de abajo hacia arriba en la pila y continúan en las demás pilas de izquierda a derecha en una locación del barco.

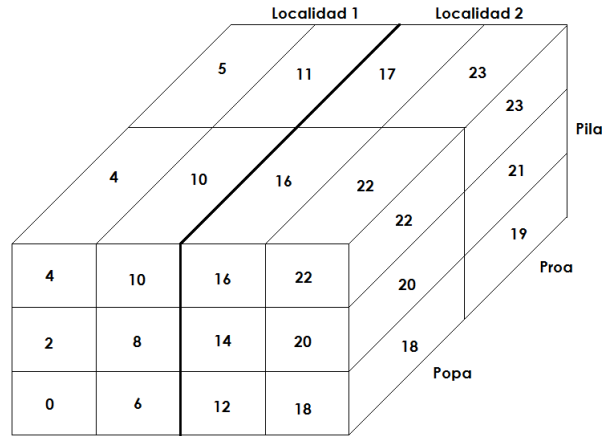


Figura 1: Índices de Slots

## 2. Conjunto de constantes

Para facilitar la construcción de las restricciones y de los objetivos a alcanzar en éste proyecto se plantean un conjunto de índices y constantes. Todos los conjuntos de índices que se presentarán son un subconjunto de enteros. Cada conjunto representa características ya sea de secciones del barco o de los contenedores (Cuadro 1).

En el modelo se propone la idea de contenedor virtual que tiene como objetivo representar que no se cargará un contenedor en el slot que lo contenga. Las características como el largo, ancho, alto y puerto de descarga serán iguales a 0. Además, el índice del contenedor virtual es igual a 0. ( $Cont^V = 0$ )

Para evitar problemas al calcular el peso de una pila, la constante  $Weight_i$  es igual a 0 para los contenedores de 20 pies que representen uno de 40 pies que se encuentra en la proa de las celdas.

## 3. Variables de decisión

Sobre las variables de decisión actuarán las restricciones que se propondrán mas adelante. Adicionalmente, estas variables modelaran los posibles resultados obtenidos al final de proceso (Cuadro 2).

Indices y constantes	Descripción
$Slots$	Conjunto de índices de bahías para los contenedores.
$Cont$	Conjunto de índices de contenedores.
$Stack$	Conjunto de índices de pilas.
$Slot_k$	Conjunto de slots por pila k.
$Slot_k^{A,F}$	Conjunto de slots de popa y proa por pila k.
$Slot_k^{NR}$	Conjunto de slots no refrigerados.
$Slot^{NRC}$	Conjunto de celdas no refrigeradas.
$Cont^L$	Conjunto de contenedores cargados.
$Cont^{\{20,40\}}$	Índice del contenedor de 20 y 40 pies.
$Cont_R^{\{20,40\}}$	Índice del contenedor refrigerados de 20 y 40 pies.
$Length_i$	Largo del contenedor i.
$Weight_i$	Peso del contenedor i.
$Height_i$	Altura del contenedor i.
$POD_i$	Puerto de descarga del contenedor i.
$Stack_i^W$	Peso limite de la pila i.
$Cont^V$	Índice del contenedor virtual.

Cuadro 1: Tabla de constantes

Variables de decisión	Descripción
$S = \{S_1, ..., S slots \}$	$S_i \in Cont$ , índice del contenedor en el $slot_i$ .
$L = \{L_1, ..., L slots \}$	$L_i \in Length$ , largo del contenedor estibado en el $slot_i$ .
$H = \{H_1, ..., H slots \}$	$H_i \in Height$ , alto del contenedor estibado en el $slot_i$ .
$W = \{W_1, ..., W slots \}$	$W_i \in Weight$ , peso del contenedor estibado en el $slot_i$ .
$P = \{P_1, ..., P slots \}$	$P_i \in POD$ , puerto de descarga del contenedor estibado en el $slot_i$ .
$HS = \{HS_1, ..., HS stack \}$	$HS_i \in HS$ , Limite de altura por pila.
$CFEUA = \{CFEUA_1, ..., CFEUA slots/2 \}$	$CFEUA_i \in \{0, 1\}$ , contenedor de 40 pies estibado en la popa.
$CFEUF = \{CFEUF_1, ..., CFEUF slots/2 \}$	$CFEUF_i \in \{0, 1\}$ , contenedor de 40 pies estibado en la proa.

Cuadro 2: Tabla de variables de decisión

## 4. Restricciones del modelo

Para el modelo se plantean un conjunto de restricciones que tienen como objetivo disminuir el espacio de búsqueda de posibles soluciones.

Para modelar algunas de las restricciones se hace uso de las siguientes abstracciones:

### Restricciones elementales

Éstas restricciones tienen la siguiente forma:

$$element(x, y, C) = \{(e, f) | e \in D(x), f \in D(y), f = C_e\}$$

Donde  $x$  es una variable entera,  $y$  es una variable con dominio finito y  $C = \{C_1, \dots, C_n\}$  un conjunto de constantes. La restricción implica que  $y$  es igual a la  $x$ -ésima constante de  $C$ .

### Restricciones regulares

Este tipo de restricciones tienen la siguiente forma:

$$regular(X, M) = \{(d_1, \dots, d_n) | \forall i. d_i \in D(x_i), d_1 \dots d_n \in L(M)\}$$

Donde  $X$  es un conjunto de variables con dominio  $D(x_i)$  tal que  $1 < i < n$  y  $M$  es una expresión regular que reconoce  $L(M)$ .

#### 4.1. Detalle de las restricciones

En ésta sección se presentan y se detallan el conjunto de restricciones modeladas (Cuadro 3).

Las restricciones <elementales> que se encuentran referenciadas del (1) al (4) son para generar una asociación entre los slots y las características de longitud, altura, peso y puerto de descarga de los contenedores que se estibarán en dichos slots. Se modelan las restricciones del (5) al (8) que tienen como función que los dos contenedores de 20 pies que representan a uno 40 pies queden estibados en la proa y popa de la misma celda, donde  $getCell(i)$  tiene como tarea obtener la celda del slot  $i$ . Se presenta la restricción (9) para cargar los contenedores abordo del barco. La restricción (10) plantea que las variables de longitud que pertenecen a una misma pila deben cumplir con la expresión regular  $R = 20*40*0^*$ . La restricción (11) y (12) implican que no es posible estibar contenedores refrigerados en slot no refrigerados. La restricción (13) y (14) restringen el dominio de los slot de 20 y 40 pies indicando que solo se pueden cargar contenedores de 20 y 40 pies respectivamente. La restricción (15) especifica el límite de altura para cada pila. El límite de peso para pila es especificado por medio de la restricción (16). Se modela la restricción (17) la cual implica que los contenedores de una pila deben estar ordenados de abajo hacia arriba y de mayor a menor peso, donde  $Min(x)$  y  $Max(x)$  especifica el mínimo y máximo índice de conjunto de slot que pertenecen a una pila.

Restricciones		
$element(S_i, L_i, Length)$	$\forall i \in Slots$	(1)
$element(S_i, H_i, Height)$	$\forall i \in Slots$	(2)
$element(S_i, W_i, Weight)$	$\forall i \in Slots$	(3)
$element(S_i, P_i, POD)$	$\forall i \in Slots$	(4)
$L_i = 40 \Leftrightarrow CFEUA_{getCell(i)} = 1$	$\forall i \in Slot_k^A$	(5)
$CFEUA_{getCell(i)} = 1 \Rightarrow S_{i+1} = S_i + 1$	$\forall i \in Slot_k^A$	(6)
$L_i = 40 \Leftrightarrow CFEUF_{getCell(i)} = 1$	$\forall i \in Slot_k^F$	(7)
$CFEUF_{getCell(i)} = 1 \Rightarrow S_{i-1} = S_i - 1$	$\forall i \in Slot_k^F$	(8)
$S_{pos(i)} = i$	$\forall i \in Cont^L$	(9)
$regular(Length_i^\alpha, R)$	$\forall \alpha \in \{A, F\}, i \in Stack$	(10)
$S_i \notin Cont_R^{20}$	$\forall i \in Slot^{NR}$	(11)
$S_i \notin Cont_R^{40}$	$\forall i \in Slot^{NRC}$	(12)
$S_i \in Cont^{20}$	$\forall i \in Slot^{20}$	(13)
$S_i \in Cont^{40}$	$\forall i \in Slot^{40}$	(14)
$\sum_{j \in slots_i^\alpha} H_j \leq HS_i$	$\forall \alpha \in \{A, F\}, i \in Stacks$	(15)
$\sum_{j \in slots_i} W_j \leq Stack_i^W$	$\forall i \in Stacks$	(16)
$W_i + W_{i+1} \geq W_{i+2} + W_{i+3} \geq \dots \geq W_{i+n} + W_{i+n+1}$	$\forall k \in Stack \text{ donde } i = Min(Slot_k^A), n = Max(Slot_k^A) - 1$	(17)

Cuadro 3: Conjunto de restricciones