

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

8 de marzo de 2014

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 poseen 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 y 2).

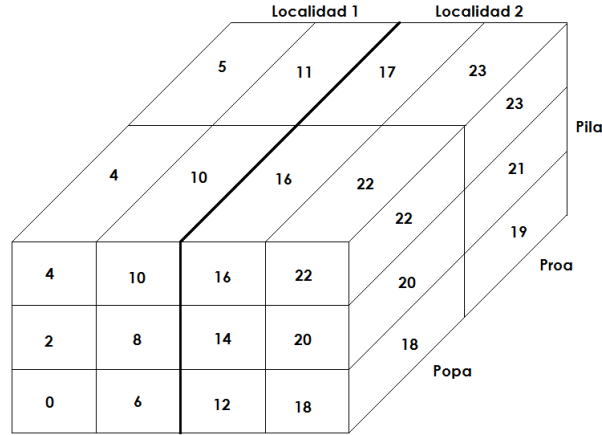


Figura 1: Índices de Slots

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. ($Cont^V = 0$)

El centro de gravedad ideal de una pila en el eje X se encuentra dado por la constante 0,5 y en el eje Y se encuentra dado la formula $(Stack_i^H / 4) / (Stack_i^H / maxLevel(i))$ donde $maxLevel(i)$ es el nivel máximo de la pila i .

Para calcular el centro de gravedad de un conjunto de contenedores agrupados en una pila es necesario proponer un sistema de coordenadas sobre cada pila. El sistema de coordenadas para cada pila empezará con el punto (0,0) sobre el centro del contenedor ubicado en la parte inferior de la pila en la sección de la popa. La coordenada aumentará en el eje X de la popa a la proa en la pila y en el eje Y de la parte inferior a la parte superior de la pila.

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.
$Slot_k^{NRC}$	Conjunto de celdas no refrigeradas.
$Cont^L$	Conjunto de contenedores cargados.
$Cont_K$	Conjunto de contenedores en la pila k.
$Cont^{\{20,40\}}$	Índice del contenedor de 20 y 40 pies.
$Cont_{A,F}^{40}$	Índice del contenedor de 40 pies separados por proa y popa.
$Cont_R^{\{20,40\}}$	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.
$Stack_i^H$	Altura limite de la pila i.
$Cont^V$	Índice del contenedor virtual.
$GCSY$	Centro de gravedad ideal en el eje Y.

Cuadro 1: Tabla de constantes.

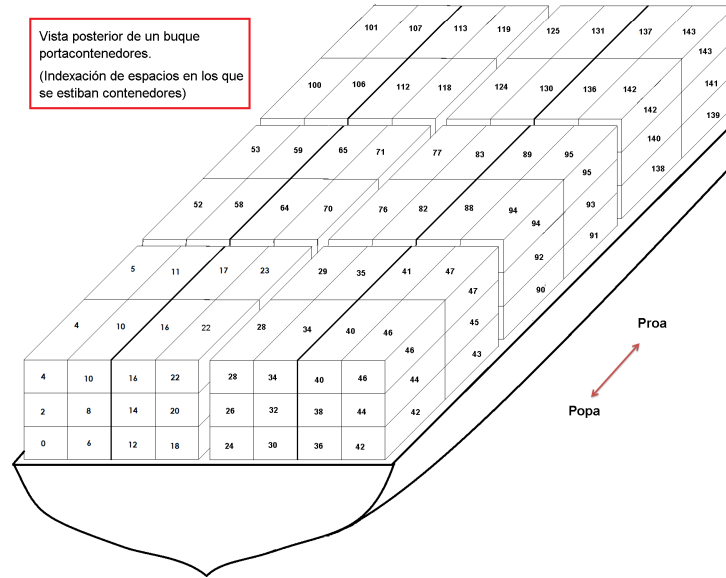


Figura 2: Indexación de Slots en buque

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 la 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).

Las variables de decisión utilizadas para calcular el costo de las soluciones encontradas son utilizadas sobre el proceso de propagación. (Cuadro 3).

4. Restricciones del modelo

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

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

Restricciones elementales

Éstas restricciones tienen las siguiente forma:

Variables de decisión	Descripción
$S = \{S_1, \dots, S slots \}$	$S_i \in \text{Cont}$, índice del contenedor en el $slot_i$.
$L = \{L_1, \dots, L slots \}$	$L_i \in \text{Length}$, largo del contenedor estibado en el $slot_i$.
$H = \{H_1, \dots, H slots \}$	$H_i \in \text{Height}$, alto del contenedor estibado en el $slot_i$.
$W = \{W_1, \dots, W slots \}$	$W_i \in \text{Weight}$, peso del contenedor estibado en el $slot_i$.
$WD = \{WD_1, \dots, WD slots \}$	$WD_i \in \text{Weight}$, peso del contenedor estibado en el $slot_i$. (Arreglo de variables no escalares).
$P = \{P_1, \dots, P slots \}$	$P_i \in \text{POD}$, puerto de descarga del contenedor estibado en el $slot_i$.
$HS = \{HS_1, \dots, HS stack \}$	$HS_i \in \text{Stack}$, Limite de altura por pila.
$CFEUA$	$= CFEUA_i \in \{0, 1\}$, contenedor de 40 pies estibado en la popa.
$\{CFEUA_1, \dots, CFEUA slots/2 \}$	
$CFEUF$	$= CFEUF_i \in \{0, 1\}$, contenedor de 40 pies estibado en la proa.
$\{CFEUF_1, \dots, CFEUF slots/2 \}$	
$OVT = \{OVT_1, \dots, OVT slots \}$	$OVT_i \in \{0, 1\}$, Contenedor sobre-estibado en el $slot_i$.
$OPT = \{OPT_1, \dots, OPT stack \}$	$OP_i \in \text{Cont_K}$, Número de contenedores diferentes en la pila i.
$NVC = \{NVC_1, \dots, NVC slots \}$	$NVC_i \in \{0, 1\}$, Contenedores no virtuales.
$WT = \{WT_1, \dots, WT stack \}$	$WT_i \in \{0, Stack_i^W\}$, Peso total de los contenedores estibados en la pila i.
$GCenY$	$= GCenY_{i,s} \in \{0, maxLevel(i)\}$, Centro de gravedad en eje Y para la pila i y el slot s.
$\{GCenY_{1,1}, \dots, GCenY stack slots \}$	
$GCY = \{GCY_1, \dots, GCY stack \}$	$GCY_i \in \{0, maxLevel(i)\}$, Centro de gravedad en el eje Y.
$GCD = \{GCD_1, \dots, GCD stack \}$	$GCD_i \in \{0, maxLevel(i)\}$, Distancia al centro de gravedad ideal por pila.
$DistCeroGC$	$= DistCeroGC_i \in \{0, 1\}$, Centro de gravedad igual a 0.
$\{DistCeroGC_1, \dots, DistCeroGC stack \}$	

Cuadro 2: Tabla de variables de decisión.

Variables de decisión	Descripción
OV	Número de contenedores sobre-estibados.
$OCNS$	Número de contenedores no estibados en el barco.
OU	Número de pilas usadas.
OP	Sumatoria del número de contenedores diferentes por cada pila.
OR	Número de contenedores no refrigerados estibados en slots refrigerados.
$OGCTD$	Sumatoria de los pesos otorgados por la distancia al centro de gravedad ideal por cada pila.
O	Variable utilizada como costo total de estiba.

Cuadro 3: Tabla de variables de decisión utilizadas para calcular el costo de la solución.

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

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 $L(M)$.

Restricciones Max

Este tipo de restricción tiene la siguiente forma:

$$max(h, i, j) = \{(e, f, g) | e \in D(h), f \in D(i), g \in D(j), e > f \Rightarrow g = e, f > e \Rightarrow g = f\}$$

Donde la restricción implica que la variable j será el valor más grande entre h e i .

4.1. Detalle de las restricciones

En ésta sección se presentan y se detallan el conjunto de restricciones modeladas (Cuadro 4 y 5).

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

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)
$CFEUA_{getCell(i)} = 1 \wedge overStowed40(i) = 1 \Rightarrow OVT_i = 1 \wedge OVT_{(i+1)} = 1$	$\forall i \in Slot_k^A$	(18)
$CFEUA_{getCell(i)} = 1 \wedge overStowed40(i) = 0 \Rightarrow OVT_i = 0 \wedge OVT_{(i+1)} = 0$	$\forall i \in Slot_k^A$	(19)
$CFEUA_{getCell(i)} = 0 \wedge overStowed20A(i) = 1 \Rightarrow OVT_i = 1$	$\forall i \in Slot_k^A$	(20)
$CFEUA_{getCell(i)} = 0 \wedge overStowed20A(i) = 0 \Rightarrow OVT_i = 0$	$\forall i \in Slot_k^A$	(21)
$CFEUA_{getCell(i)} = 0 \wedge overStowed20F(i) = 1 \Rightarrow OVT_{(i+1)} = 1$	$\forall i \in Slot_k^A$	(22)
$CFEUA_{getCell(i)} = 0 \wedge overStowed20F(i) = 0 \Rightarrow OVT_{(i+1)} = 0$	$\forall i \in Slot_k^A$	(23)
$OPT_k = (Slot_k)$	$\forall k \in Stacks$	(24)
$NVC_i = 1 \Rightarrow S_i \neq S_j$	$\forall i \in Slots, \forall j \in Slots i \neq j$	(25)
$GCenY_{i,s} = WD_s * getPosY(s)$	$\forall i \in Stacks, s \in Slots_i$	(26)
$GCY_i = (\sum GCenY_{i,s}) / WT_i$	$\forall i \in Stacks, s \in Slots_i$	(27)
$PenY_i = GCY_i - GCSY$	$\forall i \in Stacks$	(28)
$Max(PenY_i, 0, GCD_i)$	$\forall i \in Stacks$	(29)
$WD_i * 1,0 = W_i$	$\forall i \in Slots$	(30)
$WT_i = \sum_{j \in slots_i} WD_j$	$\forall i \in Stacks$	(31)
$S_i \notin Cont_A^{40}$	$\forall i \in Slot_k^F, \forall k \in Stacks$	(32)
$S_i \notin Cont_F^{40}$	$\forall i \in Slot_k^A, \forall k \in Stacks$	(33)

Cuadro 4: Conjunto de restricciones

Restricciones para calcular el costo	
$OV = \sum_{i \in Slots} OVT_i$	(34)
$OCNS = Cont - getCountNVC() - 1$	(35)
$OU = getNotEmptyStack()$	(36)
$OP = \sum_{i \in stacks} OPT_i$	(37)
$OR = getContNRSlotR()$	(38)
$OGCTD = \lceil (\sum_{i \in stacks} GCD_i) / 0,05 \rceil$	(39)
$O = 1000 * OCNS + 100 * OV + 20 * OP + 10 * OU + 5 * OR + 5 * OGCTD$	(40)

Cuadro 5: Conjunto de restricciones

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 limite de altura para cada pila. El limite 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. Las restricciones del (18) al (23) tienen como objetivo identificar cuando un contenedor ésta sobre-estibado. Para una mejor entendimiento sobre las restricciones de sobre-estiba, se detallará cada una de las restricción. Las restricciones (18) y (19) solo aplicara para los contenedores 40 pies, éstas restricciones utilizan la función $overStowed40(i)$ que indica si existe $P_i > MinP(x)$, donde $MinP(x)$ es el mínimo puerto de descarga de un conjunto x que contienen los puertos de descarga de los contenedores estibados en slots inferiores a i y que pertenecen a la misma pila. La restricciones (20), (21), (22) y (23) solo aplican para contenedores de 20 pies, éstas restricciones usan la función $overStowed20A(i)$ y $overStowed20F(i)$ las cuales funcionan de la misma forma que $overStowed40(i)$. La diferencia es que $overStowed20A(i)$ actúa solo sobre los contenedores estibados en la popa de una misma pila y $overStowed20F(i)$ actúa solo sobre los contenedores estibados en la proa de una misma pila. La restricción (24) tiene como objetivo contar por cada pila la cantidad de puertos de descarga diferentes. La restricción (25) implica el hecho de que un contenedor no puede estar en diferentes slots a excepción del contenedor virtual. Para calcular el centro de gravedad de los slots de una pila en el eje Y se utiliza la restricción (26); no se calcula el centro de gravedad en eje x debido a que brinda no brinda información relevante. El calculo del centro de gravedad de la pila en eje Y se realiza por medio de la restricción (27). La restricción (28) se utiliza para calcular la penalización que corresponde a la distancia entre el centro de gravedad calculado para la pila en el eje Y y el centro de gravedad ideal de la pila el cual es representado por medio de GC_{SY} . La distancia del centro de gravedad para cada pila se obtiene del máximo valor entre la penalización por pila y

la constante 0, ésta distancia se obtiene por medio de la restricción (29). La restricción (30) se utiliza para llenar la variable de peso auxiliar de los contenedores. La (31) se utiliza para obtener el peso total de los contenedores estibados por pila. Las restricciones (32) y (33) son para que la separación de los contenedores de 40 pies en uno de proa y otro de popa se estiben respectivamente en slots de proa y popa respectivamente. (Cuadro 4).

Las restricciones utilizadas para calcular el costo de la soluciones se encuentran referenciadas del (34) al (40). Se debe tener en cuenta que para éste modelo las restricciones de costo para los contenedores de 40 pies es el doble de uno de 20 pies. A continuación, se detalla cada unas de las restricciones de costo.

La restricción (34) tiene como objetivo calcular el costo de los contenedores sobre-estibados. Un contenedor se considera sobre-estibado en una pila cuando este contiene un puerto de descarga mayor a cualquiera de los puertos de descarga de los contenedores que se encuentren por debajo del mismo. La restricción (35) cuenta el costo de contenedores no estibados en el buque. El costo de contenedores no estibados se obtiene de la total de contenedores menos la cantidad de contenedores no virtuales estibados, obtenido mediante la función *getCountNVC()*, menos el contenedor virtual. La función *getNotEmptyStack()* es la encargada de obtener las pilas no vacías y se utiliza sobre la restricción (36). La restricción (37) suma la cantidad de contenedores con puerto de descarga diferente en una misma pila. La restricción (38) utiliza la función *getContNRSslotR()* que obtiene la cantidad de contenedores no refrigerados estibados en espacios refrigerados. La restricción (39) se encarga de obtener el peso del centro de gravedad, éste calculo consiste en aplicar el la función techo de la sumatoria de los centros de gravedad de cada pila dividido por la constante 0,05. Por último, la restricción (40) obtiene el costo total de la solución encontrada (Cuadro 5).

4.2. Diagramas de las restricciones aplicadas

Esta sección tiene como objetivo ejemplificar y mostrar con detalle la utilización de las restricciones sobre el modelo de estiba.

La figura 3 muestra cómo se ligan las variables de decisión L , H , W y P por medio de la utilización de las restricciones tipo *Elemental*. (Restricciones (1), (2), (3) y (4))

La figura 4 muestra cómo se debe estibar un contenedor de 40 pies en el modelo. Un contenedor de 40 pies pasa a convertirse en dos de 20 pies y es necesario que éstos contenedores sean adyacentes. Adicionalmente, se debe cumplir con el hecho de que el contenedor de 20 pies creado para representar la popa del contenedor de 40 pies solo se puede estibar en la popa de la pilas y ésta misma condición aplica para los contenedores de 20 pies que representan la proa del contenedor de 40 pies. (Restricciones (5), (6), (7), (8), (32) y (33))

En la figura 5 se muestra que los espacios de una pila pueden estar ocupados por un contenedor. Se presenta la imagen por que es importante establecer que espacios en el buque están ocupados por contenedores ya cargados.(Restricción (9))

La figura 6 muestra como debe quedar una pila de contenedores después de estibarla. (Restricción (10))

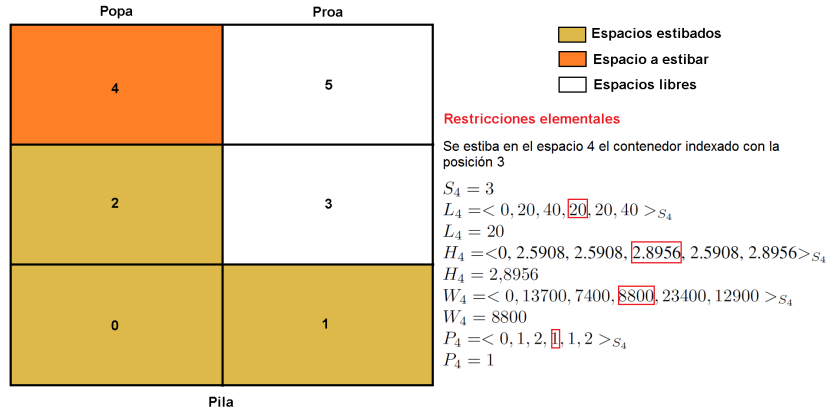


Figura 3: Restricción Elemental

5. Propagación del modelo

La propagación del modelo se realiza por medio de una función de costo que tiene en cuenta los siguientes objetivos:

- Minimización de los contenedores no estibados, variable **OCNS**. Se adicionará un costo de 120 unidades por cada contenedor no estibado.
- Minimización de la sobre-estiba, variable **OV**. Se adicionará un costo de 100 unidades por cada contenedor sobre-estibado.
- Minimización de los puertos de descarga de los contenedores en cada pila, variable **OP**. Se agregará por cada puerto de descarga adicional de los contenedores en la pila un costo de 20 unidades.
- Minimización de las pilas vacías, variable **OU**. Se adicionará por cada nueva pila usada un costo de 10 unidades.
- Minimizar la carga de contenedores no refrigerados en celdas refrigeradas, variable **OR**. Se adicionará un costo de 5 unidades por cada contenedor no refrigerado estibado en una celda refrigerada.
- Minimización de la distancia desde el centro de gravedad ideal de una pila al centro de gravedad real de la pila estibada, variable **OGCTD**. Se adicionará un costo de 5 unidad por cada peso otorgado por la distancia de los centros de gravedad.

Actualmente, el modelo se propaga sobre el conjunto de variables de decisión S . Aquí, se busca la variable con menor dominio y posteriormente se asigna el valor mas cercano a la media.

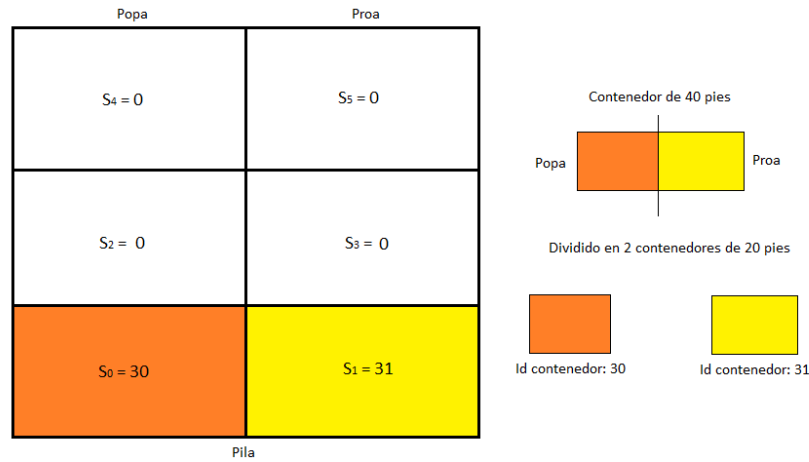


Figura 4: Restricciones para estibar contenedores de 40 pies

6. Pruebas

Las pruebas con las que se prueba el modelo son instancias reales del problema estiba de contenedores. Para obtener una buena cantidad de resultado se toma aleatoriamente una muestra 100 instancias de la población de instancias. La ejecución de cada instancias será exactamente de 10 minutos.

En el primer caso se prueba el modelo utilizando la propagación de las variables de decisión S . Adicionalmente, se toma del conjunto de variables la variable que tiene el menor dominio y posteriormente se toma el valor mas pequeño del rango de la variable a propagar. (Figura 7)

En el segundo caso de prueba lo que se modifica es que las variables S toman el valor promedio del rango de la variable. (Figura 8)

7. Trabajo en el segundo periodo

Se tienen como objetivo en el segundo periodo adicionar al modelo, restricciones que permitan encontrar buenas soluciones de trincaje de contenedores teniendo en cuenta la seguridad y estabilidad del barco y los contenedores. Adicionalmente, es necesario crear e implementar un algoritmo de vecindad para ejecutar la búsqueda local de soluciones.

Por último, se requiere ejecutar un serie de pruebas con instancias reales sobre el modelo construido y registrar los datos obtenidos.

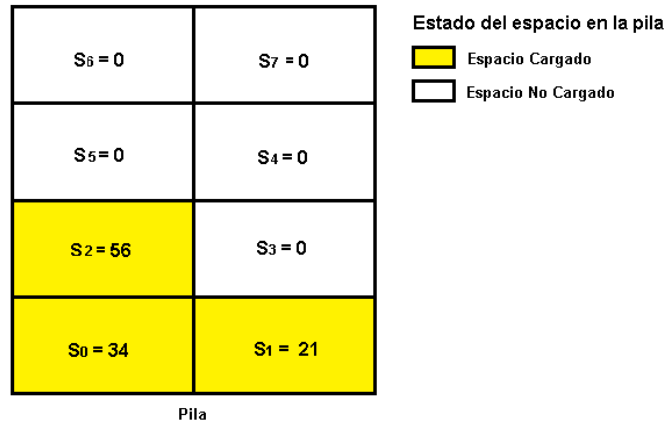


Figura 5: Restricción que modela los contenedores ya cargados.

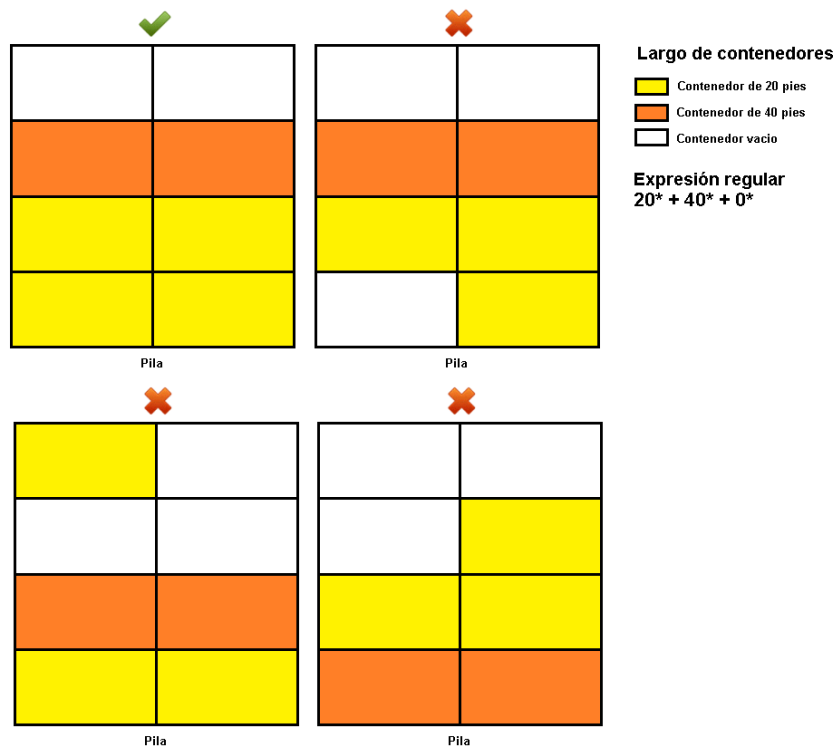


Figura 6: Restricciones para tener una pila bien formada.

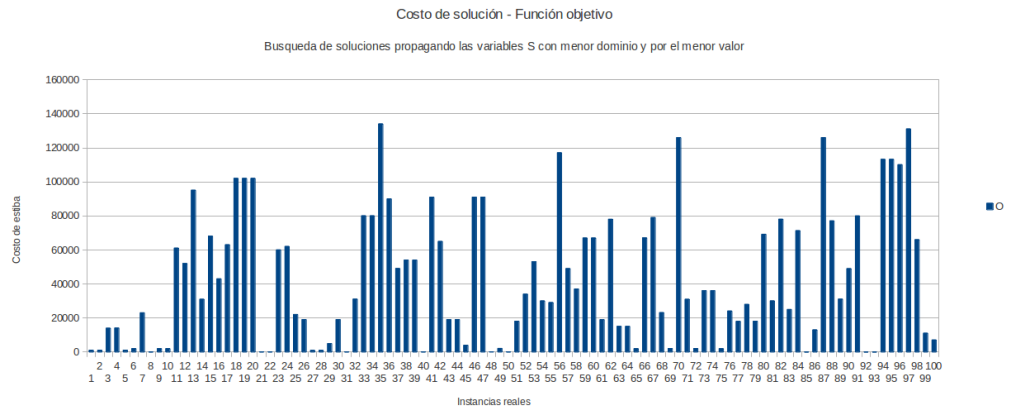


Figura 7: Diagrama de barras con el valor de la función objetivo del primer caso de prueba.



Figura 8: Diagrama de barras con el valor de la función objetivo del segundo caso de prueba.