

3. Clasificación de los sub-sistemas de una terminal de contenedores marítima

Las terminales portuarias son un nodo básico en las redes de transporte mundiales, por lo cual todas las operaciones de estas deben ser optimizadas con el fin de lograr la máxima productividad global en este nodo de la red, Ambrosino et al (2004). Diferentes autores han realizado una división de la operativa de la terminal marítima de contenedores en sub-sistemas, lo cual permite un mejor aprovechamiento de los recursos debido a la diversidad en la maquinaria que se emplea para su funcionamiento.

En la literatura encontramos trabajos como los realizados por Steenken et al (2004) y Steenken D y Voß S. (2008) en los cuales los autores recopilan los principales trabajos relacionados con la gestión de las terminales de contenedores. Los autores agrupan los diferentes trabajos según el sub-sistema de la terminal gestionada. Se debe tener en cuenta que la operativa de cada terminal depende de su tipo, lo cual a su vez depende de factores como tamaño, tipo de mercancía manipulada, etc. Entre los diferentes tipos de terminal los dos principales grupos son las terminales de contenedores especializadas “hubs” y los terminales de contenedores multipropósito. En la figura 13 se clasifican los sub-sistemas de una terminal de contenedores portuaria.

Las terminales marítimas con poco tránsito de contenedores en la mayoría de los casos no tendrían la clasificación de sub-sistemas u operativas mostradas en la figura 13 ya que por sus características particulares disponen de sus propias operativas, o bien agrupan algunas de ellas, ya que su complejidad es mucho menor.



Figura 13 Operativas de una terminal de contenedores portuaria

Una TCP como se explico anteriormente por lo general tienen cuatro zonas claramente definidas las cuales son: zona de operación, zona de almacenamiento, zona de cambio de modo de transporte y la zona de servicio. En este trabajo no se tiene en cuenta la zona de servicio ya que no es el objeto de este análisis. En las tres restantes se analizaran los diferentes problemas que se presentan y se clasificaran de acuerdo a tres grupos de planificación que se persiguen en la generalidad de las terminales.

3.1. Notación

Se establece una notación genérica que sirve como base para la presentación de los diferentes modelos de los distintos problemas abordados, teniendo en cuenta que si es necesario se realizaran pequeñas variaciones, y en tal caso se realizaran las respectivas aclaraciones.

Parámetros:

- C** Conjunto de contenedores que están en las terminales marítimas tanto para exportación como para importación.
- T** Hace referencia al horizonte de tiempo en que se realiza una actividad.
- Q** Hace referencia a la capacidad máxima que pueden soportar diferentes elementos relacionados con la operativa de una TCP.
- L** Conjunto de posibles localizaciones para diferentes entidades como contenedores, buques, etc. en diferentes zonas de la terminal de contenedores.
- B** Conjunto de medios de transporte marítimos que llega a una terminal ya sea para entregar o recoger contenedores. Estos tendrán asociado índice b , $b \in B$.
- M** Conjunto de modos de transporte terrestre que realizan operaciones de carga y descarga en una terminal marítima de contenedores.
- G** Conjunto de equipos presentes en una terminal marítima de contenedores los cuales permiten realizar las diferentes actividades de manipulación, carga y descarga de las mercancías.

Variables:

- X_{ij} Variable binaria relacionada con la asignación de recursos a actividades o tareas específicas de forma que ésta tome valor 1 si el equipo (maquina) i realiza la tarea j y 0 en otro caso.
- Y_j Variable de decisión que proporciona el número total de recursos como maquinaria, que son asignados para realizar la tarea j .

Datos:

- t_{ij} Tiempo que tarda el equipo i en realizar la tarea j .
- f_i Coste fijo por utilizar el recurso i . Esto hace referencia a todos los tipos de costes fijos que se generen al utilizar un recurso o al asignarlo para la realización de una tarea.
- v_i Coste variable por utilizar el recurso i . Esto hace referencia a los costes variables en que se pueden incurrir durante la utilización de un recurso.

3.2. Operativa de buque “*The ship planning process*”

El aviso de que un buque portacontenedores llega a una TCP, genera tres importantes preguntas que se deben resolver mucho antes de que este llegue. Los incrementos en el tamaño de los buques y en el flujo de contenedores en el comercio mundial han generado que dichas preguntas se conviertan en verdaderos problemas para las TCP, estos problemas son:

- El problema de asignación de muelles o *Berth allocation problem*.
- La planificación de las estiba dentro del buque / plan maestro de muelle o *Stowage planning problem / Master bay planning problem*.
- *Problema de programación de grúas pórtico o The quay crane scheduling problem*.

Estos tres problemas comparten un mismo objetivo el cual es minimizar el tiempo que los buques portacontenedores pasan en la TCP. Este tiempo está conformado por el tiempo de operaciones de carga y descarga de contenedores y por los tiempos de espera. A continuación se explica cada situación.

3.2.1. Asignación de muelle “*Berth allocation*”

Cada vez que un buque llega a una TCP, son tenidas en cuenta sus características básicas tales como: tamaño, cantidad de contenedores a descargar y cargar, y las localizaciones de estos, para decidir que muelle se le debe asignar. Dichas características proporcionan cierta información que se debe utilizar previamente para planificar la asignación del muelle teniendo en cuenta las siguientes situaciones:

- Según la localización del muelle asignado, los contenedores que le serán cargados deben estar almacenados lo más cerca posible. De igual forma se debe reservar espacio en la zona de almacenaje (ZA) lo más cerca posible para los contenedores que serán descargados.
- Planificar el tiempo que estará ocupando el muelle por cada buque y por ende sincronizarlo con los otros buques que llegaran.

El objetivo de este problema es minimizar el tiempo total de servicio el cual incluye, el tiempo de espera del buque para entrar al puerto y el tiempo de operación de carga y descarga.

Muchos autores han realizado diferentes adaptaciones del *Berth Allocation Problem* (BAP) para proponer métodos de solución, por ejemplo Imai et al (2001), Imai et al (2005a) y Nishimura et al. (2001), determinan el BAP como un problema de asignación de muelle dinámico (DBAP) el cual es una generalización del problema de asignación de muelle estocástico (SBAP). Ellos proponen un algoritmo genético en sistemas de muelles públicos que pueden ser adaptados a una aplicación real.

Liu et al (2006) y Lim (1998), consideran que el BAP y el problema de programación de grúas pórtico (QCSP) son un único problema ya que el tiempo que un buque estará atracado en un muelle dependerá del numero de grúas que le sea asignadas. Imai et al (2005) e Imai et al (2006a), resuelven el BAP en TCP con sistema de multi-usuarios. En el primer trabajo los autores usan un espacio de localización continuo y en segundo trabajo ellos resuelven el problema mediante el uso de algoritmos genéticos en un puerto con muelles interiores (*idented berth*), en los cuales los mega-portacontenedores y los *feeders* son servidos con alta productividad de muelle. Imai et al (2003), considera las relaciones entre las TCP y las líneas marítimas de transporte ya que algunas de estas exigen prioridad de servicio en algunos de sus buques, los autores modifican el BAP para convertirlo al BAP con servicios prioritarios.

Park y Kim (2003a), proponen un método para la asignación de los muelles y la programación de las grúas pórtico. Para los autores los muelles son un recurso crítico que determina la capacidad de las TCP, esto debido a que el coste de construir un muelle es más alto que cualquier inversión en otro tipo de instalación, lo que obliga a realizar tareas de planificación en las terminales para optimizar la utilización de los muelles con el propósito de aumentar la productividad.

Los autores consideran el BAP y el QCSP de forma conjunta basándose en que el tiempo total que permanece un buque en muelle depende directamente del número de grúas asignadas a éste para realizar las tareas de carga y descarga ya que a mayor numero de grúas asignadas menor será el tiempo de operación.

En el trabajo el problema es abordado en dos fases, la primera llamada fase de programación tiene como propósito realizar la asignación de los muelles, determinar el tiempo de operación y el número de grúas asignadas a cada buque. La segunda fase, llamada fase de asignación de grúas, toma como base los resultados obtenidos en la primera fase para programar el comienzo y el final de operación para cada grúa y para cada buque. En esta apartado solo se analizará la primera fase ya que es la que corresponde a la asignación de muelle.

Para la interpretación de los datos y como herramienta de ayuda los autores diseñan un gráfico donde se ilustran las soluciones admisibles obtenidas del modelo, en la figura 14 se muestra una solución admisible del problema para 5 buques portacontenedores.

El eje horizontal representa el tamaño total del muelle de la terminal (toman el muelles como una línea costera continua) y el eje vertical representa el tiempo disponible para realizar la carga y descarga de contenedores. Cada uno de los rectángulos en el gráfico que están señalados con letras representa buques portacontenedores. Los cuadros pequeños que representan unidades de tiempo y longitud de muelle y los números dentro del gráfico en el eje vertical corresponden a la cantidad de grúas asignadas a un buque en cada instante de tiempo.

La figura 14 representa una solución admisible para 5 buques portacontenedores en la cual se puede ver por ejemplo, que el buque B comenzara operaciones en el instante de tiempo 5 con 3 grúas pórtico y terminara en el 9 con 2 grúas pórtico, además el muelle utilizará 7 unidades de muelle las cuales están entre el punto 7 y el 13.

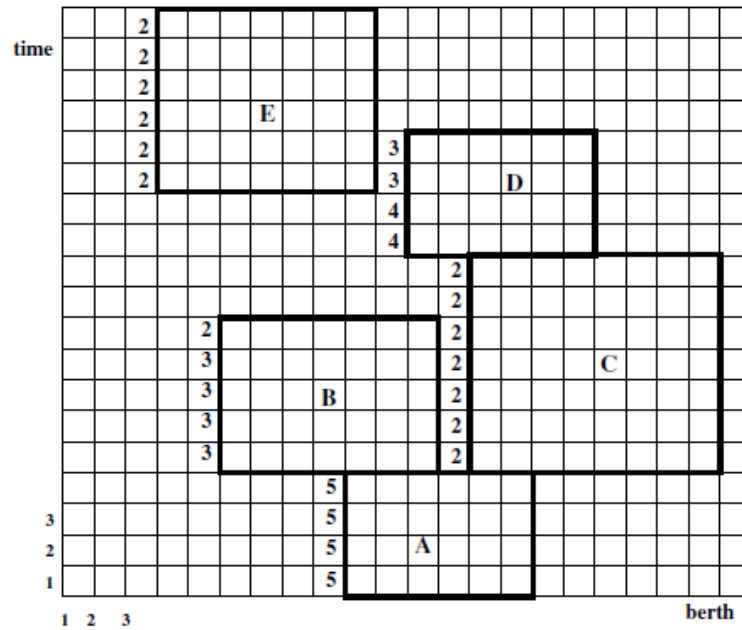


Figura 14. Solución admisible del BAP

Fuente: Park y Kim (2003a)

Modelo para el BAP

Parámetros

- B** Número total de buques.
- L** Número total de las diferentes posiciones de atraque.
- T** Número total de segmentos de tiempo.

Datos:

- e_b** Tiempo de espera de llegada (TEL) del buque b . TEL es un tipo de acuerdo entre la empresa naviera y el operador del terminal, en el cual se estima el tiempo de llegada de los buques.
- t_b** Tiempo total de operación de las grúas, el cual es expresado como el número total de segmentos de tiempo requeridos para la carga y descarga de todos los contenedores del buque b .
- d_b** Largo del buque b .
- s_b** Tiempo programado para la salida del buque b .
- r_b** Distancia mínima entre la localización de atraque y los contenedores que serán cargados al buque b .
- v_{1b}** Coste de manipulación de los contenedores por unidad de distancia del buque b , entre el muelle y la explanada.

- v_{2b} Coste de penalización del buque b por cada unidad de tiempo de llegada antes del e_b
- v_{3b} Coste de penalización del buque b por cada unidad de tiempo de llegada después del e_b
- v_{4b} Coste de penalización del buque b por cada unidad de tiempo de espera adicional a la acordada.
- g_b Número mínimo de grúas que pueden ser asignadas al buque b .
- a_b Número máximo de grúas que pueden ser asignadas al buque k .
- d Número total de grúas disponibles ($d > a_b$)

Variables:

- l_b Posición de atraque del buque b en el eje del muelle.
- T_b Tiempo de atraque del buque b en el eje del tiempo.
- Y_{bt} Número de grúas asignadas al buque b en el segmento del tiempo t .
- p_b Segmento de tiempo más 1, en el que termina la manipulación de los contenedores del buque b , tal que el máximo valor de t sea $Y_{tk} > 0$
- X_{ltb} 1, si la casilla (l,t) de la cuadrícula está cubierta por el rectángulo del buque k y 0 de otra forma.

Restricciones:

$$\sum_{b=1}^B X_{ltb} \leq 1 \quad \forall l = 1, \dots, L, t = 1, \dots, T \quad (1.2)$$

Teniendo en cuenta la figura 14, se puede decir que esta restricción controla que cada cuadro o coordenada (l,t) solo puede estar cubierta por un buque b . En otras palabras que solo se puede asignar a un buque la localización de atraque l en el segmento de tiempo t .

$$\sum_{b=1}^B Y_{bt} \leq d \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (1.3)$$

Con esta restricción se limita el número de grúas que pueden ser asignadas a todos los buques b que estén atracados en el segmento de tiempo t de acuerdo a las grúas disponibles. Se debe revisar esta condición en cada segmento de tiempo t ya el número de buques varía con el tiempo (según las llegadas y salidas).

$$\sum_{t=1}^T Y_{bt} \geq t_b \quad \forall b = 1, \dots, B \quad (1.4)$$

Esta restricción obliga a que el total de grúas asignadas al buque b en el segmento de tiempo t satisfaga el tiempo de grúas requerido para las operaciones de éste. De hecho t_b está expresado como grúas/segmento de tiempo.

$$X_{ltb} = \{0, 1\} \quad (1.5)$$

$$Y_{bt} = 0, g_b, \dots, a_b \quad (1.6)$$

Las restricción (1.5) es una especificación de variable binaria y la (1.6) garantiza que los valores que puede tomar y_{bt} estén entre cero y a_b .

Modelo:

$$\text{Min} \sum_{b=1}^B \{v_{1b}|l_b - r_b| + v_{2b}(e_b - T_b) + v_{3b}(T_b - e_b) + v_{4b}(p_b - s_b)\} \quad (1.1)$$

$$\text{Sujeto a} \sum_{b=1}^B X_{ltb} \leq 1 \quad \forall l = 1, \dots, L, t = 1, \dots, T \quad (1.2)$$

$$\sum_{b=1}^B Y_{bt} \leq d \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (1.3)$$

$$\sum_{t=1}^T Y_{bt} \geq t_b \quad \forall b = 1, \dots, B \quad (1.4)$$

$$X_{ltb} = \{0, 1\} \quad (1.5)$$

$$Y_{bt} = 0, g_b, \dots, a_b \quad (1.6)$$

La función objetivo minimiza el sumatorio de todos los costes implicados en la operativa. El primer sumando de esta corresponde a los costes de desplazamiento entre el muelle y la ZA. El segundo sumando contempla el coste causado por las llegadas tarde de los buques según los acuerdos iniciales. De igual forma el tercer sumando tiene en cuenta los costes asociados a las llegadas anticipadas fuera de lo acordado y por último los costes de penalización por terminar las operaciones de

carga y descarga en un instante de tiempo diferente al pactado son tenidos en cuenta en el cuarto sumando.

Los autores en la segunda fase determinan qué grúas en específico serán asignadas a cada buque ya que al resolver la fase anterior podemos obtener entre las respuestas arrojadas por el modelo que el buque requiere 3 grúas en cada segmento de tiempo pero no cuales serán. No se detalla aquí la segunda fase ya que la programación de grúas es trabajada como un problema independiente en el apartado 3.2.3.

En la tabla 3 se realiza una clasificación de las referencias más relevantes que fueron consultadas enfocadas a la gestión de muelles en las TCP.

Tabla 3 Clasificación de las referencias que trabajan la asignación de muelles

Trabajo	Modelo	Metodología	Objetivo
Evers y Feijter (2004)	Modelo de simulación	Simulación	Evaluar métodos
Lokuge y Alahakoon (2007)	Proceso algorítmico	Sistemas multi-agentes MAS	Minimizar tiempo de espera
Kim y Kyung (2003)	MIP	Heurística	Minimizar tiempos y costes
Wang y Lim (2007)	MIP	Heurística	Minimizar costes
Imai et al (2008)	IP	Heurística + Algoritmo Genético	Minimizar costes
Meisel y Bierwirth (2009)	MIP	Meta heurística	Minimizar costes
Cordeau et al (2005)	MIP	Heurística y Búsqueda tabú	Minimizar tiempos
Cordeau et al (2007)	QP	Heurística	Minimizar distancias
Park y Kim (2003)	IP	Heurística	Minimizar costes
Lim (1998)		Heurística descriptiva	Minimizar tiempos
Imai et al (2007)	IP	Heurística y Algoritmo Genético	Minimizar tiempos
Imai et al (2003)	MIP	Heurística	Minimizar tiempos
Imai et al (2005)	LP	Heurística	Minimizar tiempos
Nishimura et al (2001)	MIP	Heurística y Algoritmo Genético	Minimizar tiempos
Moorthy y Teo (2006)	Proceso algorítmico	Meta heurística	Minimizar tiempos y costes
Imai et al (2001)	MIP	Meta heurística	Minimizar tiempos y costes
Imai et al (2005b)	MIP	Meta heurística	Minimizar tiempos y costes
Dai et al (2004)	IP	Heurística	Minimizar tiempos
Liang et al (2009)	MIP	Heurística y Algoritmo Genético	Minimizar tiempos

3.2.2. Planificación de Estiba en el buque o Plan maestro de muelle “*Stowage planning Problem / MBPP – Master Bay Planning Problem*”

En el pasado el plan de apilado de contenedores dentro del buque (*Stowage Planning Problem - SPP*) era planificado por las líneas navieras. Ellas diseñaban su plan de estiba debido a que necesitaban maximizar su capacidad de carga y cumplir protocolos de seguridad que permitieran la estabilidad del buque. Todo esto se basaba en que eran estas quien tenían gran cantidad de información de la carga mucho antes que la terminal Dorndorf et al (2007).

En la actualidad las navieras continúan realizando un plan de estiba para cada TCP que visitan. Este es entregado a los operadores con el fin de ser cumplido y por lo tanto sea realizada la operación de carga en el menor tiempo posible. Esto genera algunos inconvenientes ya que de igual forma las TCP realizan su plan de estiba y en muchos casos al ser diferentes genera un problema conocido como relocalización de contenedores en la ZA el cual se explicará con detalle en el apartado 3.3.2. En Imai et al (2006b) plantean un modelo multi-objetivo para dar solución a esta situación en el cual se busca maximizar la estabilidad del buque y minimizar las relocalizaciones en la ZA.

Los principales objetivos del SPP son maximizar la utilización del buque y minimizar el tiempo que permanece atracado en la terminal y algunos trabajos como Alvarez (2006) adicionalmente tienen en cuenta la estabilidad de cada uno de los bloques de contenedores. Para diseñar el plan de estiba se considera el plan que las líneas navieras realizan como un pre plan, además de aspectos como: tamaño, peso, puerto de destino (para los que se cargan y los que ya están abordo), entre otros. Generando así un plan de estiba exacto.

En algunos casos el SPP es llamado plan maestro de localización de contenedores dentro del buque (*MBPP- Master Bay Planning Problem*) como en Ambrosino et al (2004), los autores determinan cómo se deben apilar un conjunto C de n contenedores de diferente tipo dentro de un conjunto L de m posible localizaciones en un buque. Tienen en cuenta algunas restricciones estructurales y operacionales, relacionadas tanto con el buque como con los contenedores. El objetivo es minimizar el total de tiempo de apilado, el cual depende del tiempo requerido para cargar todos los contenedores a bordo y minimizar el coste de relocalización de contenedores.

En algunos trabajos el SPP es abordado como un problema de embalaje. Por ejemplo Sciomachen y Tanfani (2007) abordan el problema considerando los contenedores como artículos y el buque un recipiente de embalaje. El objetivo es minimizar el tiempo de estiba. En este objetivo coinciden la mayoría de los trabajos ya que todas las navieras toman como criterio en las decisiones de las TCP que visitaran en sus rutas; la productividad de las TCP medida en “operaciones de manipulación de contenedores por hora”.

En el trabajo de Ambrosino et al (2006) Para resolver el problema tienen en cuenta la estructura y el tamaño del buque, considerando dos tipos de buques portacontenedores el RO-RO (Roll on – Roll off) en el cual se cargan y descargan los contenedores a través de rampas localizadas en la proa o en la popa del buque y los Lo-Lo (Lift on – Lift off) en los cuales los contenedores son cargados y descargados por la cubierta (utilizando grúas). Los autores identifican cada localización con tres índices que da su posición en tres dimensiones:

- Sección en el buque con respecto a su división transversal desde la proa a la popa representada por i .
- Hileras que dan la posición con respecto vertical, división del buque de lado a lado (se inicia la numeración del centro hacia fuera), representada por j .
- Nivel el cual da la posición con respecto a las posiciones horizontales en las correspondientes secciones (se comienza a numerar del fondo de la bodega a la parte superior del buque) representada por k .

Se debe tener en cuenta que los números de identificación de la posición del contenedor en el buque dependen del sistema adoptado por cada compañía marítima, en este trabajo los autores eligieron uno de los más usados; una clasificación incremental con respecto al primer índice, esto se puede observar en la Figura 15.

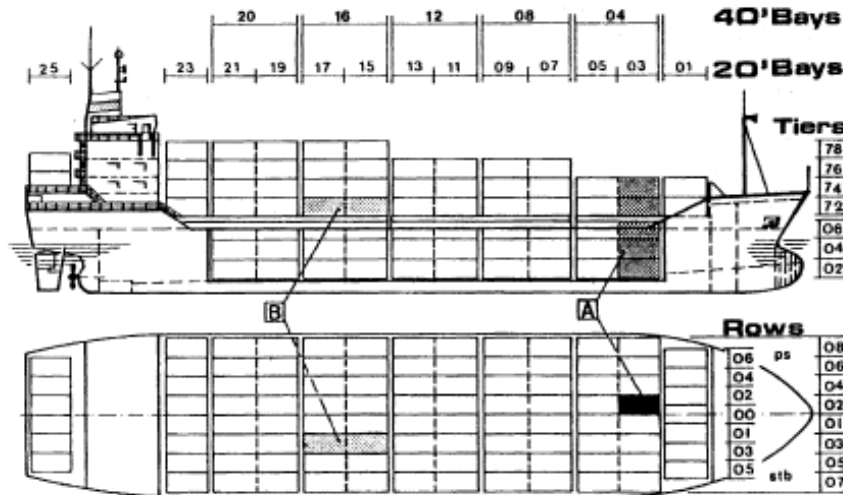


Figura 15 Sistema de división de un buque portacontenedores

Fuente: Ambrosino et al (2006)

Las secciones son numeradas de proa a popa, para los contenedores de 20' están numeradas con números impares (1, 3, 5, etc.) y dos secciones impares contiguas convencionalmente representan una sección de 40' que está numerada con números pares (2, 4, 6), por ejemplo en la figura 15 la sección 4 corresponde a la sección 3 y la sección 5. Para el segundo índice, correspondiente a las hileras, las localizaciones están dadas en números pares si estos están localizados de lado al mar o en números impares si están del lado al muelle. Finalmente para el tercer índice, correspondiente a los niveles, son numerados del fondo del buque a la cubierta, con números pares salvo los niveles que se encuentran por encima de la cubierta a los cuales se le asignaran números superiores a 50 (72, 74, 76), con el objetivo de diferenciar los contenedores que están dentro del buque y sobre el buque.

Para diseñar y resolver el modelo propuesto, los autores tienen en cuenta las siguientes consideraciones que en algunos casos serán convertidas en restricciones del problema:

- El número de secciones, hileras y niveles de cada buque y sus restricciones estructurales y operacionales son conocidas.
- Son conocidas todas las características de los contenedores que serán cargados.
- Son considerados dos tamaños estándar de un contenedor; de 20' y 40' de largo con una altura y ancho de 8 X 8'.

- El peso de un contenedor localizado en cierto nivel no puede ser mayor que el peso del contenedor que esté por debajo de este teniendo igual sección e hilera.
- El equilibrio transversal está dado por la igualdad del peso del lado derecho e izquierdo del buque incluyendo las hileras impares de la bodega y las de encima de la cubierta (con un grado de tolerancia expresado como Q1).
- El equilibrio horizontal se cumple si el peso en la popa es igual (dicho como Q2) al peso en la proa.
- El equilibrio vertical evalúa que el peso de cada nivel debe ser mayor o igual que el peso del nivel inmediatamente superior o por encima de éste.
- Se asume que todos los contenedores están listos para ser cargados sin considerar su posición de apilado en la explanada.

Las consideraciones de equilibrio son de gran importancia ya que el buque debe ser cargado de manera que pueda ser capaz de permanecer estable en el viaje, independientemente de las diferentes condiciones de la marea y después de algunas posibles operaciones de carga y descarga en destinos intermedios.

Modelo para el SSP

Parámetros:

- T** Conjunto de contenedor de 20 pies a cargarse en el buque.
F Conjunto de contenedor de 40 pies a cargarse en el buque.
R Conjunto de contenedores frigoríficos y peligrosos a cargarse en el buque.
D Conjunto de posibles destinos
C Conjunto de contenedores
L Conjunto de localizaciones
I Conjunto de secciones en que se encuentra dividido el buque
J Conjunto de hileras en que se encuentra dividido el buque de lado a lado
K Conjunto de niveles en que está dividido el buque
T Tiempo total de apilado

E y O: Conjunto de secciones pares e impares, respectivamente, tal que
 $E \subset I, O \subset I \text{ y } E \cup O \equiv I$

A y P: Conjunto de secciones anteriores y posteriores, respectivamente, tal que
 $A \subset I, P \subset I \text{ y } A \cup P \equiv I$

H y Z: Conjunto de hileras del lado derecho y del lado izquierdo, respectivamente, tal que $H \subset J$, $Z \subset J$ y $H \cup Z \equiv J$

Datos:

- Q** Capacidad de peso máxima del buque portacontenedores.
- W_c** Peso del contenedor c , donde $c = 1, \dots, C$.
- MT** Peso máximo de un pilar de 3 contenedores de 20'.
- MF** Peso máximo de un pilar de 3 contenedores de 40'.
- d_c** Destino del contenedor c .
- Q_1** Equilibrio horizontal del buque.
- Q_2** Equilibrio vertical del buque.
- t_{lc}** Tiempo requerido para ubicar el contenedor c en la localización l

Variable:

Solo se incorpora la siguiente variable de de decisión binaria

$$x_{lc} = \begin{cases} 1 & \text{si el contenedor } c \text{ es apilado en la localización } l \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases}$$

El índice l corresponde a la localización l -esima, que está actualmente identificada por los subíndices i,j,k representando respectivamente la sección, hilera y fila en la que se ubicara cada contenedor. Lo anterior significa que en la practica la variable $x_{lc} = x_{ijkc}$, lo que dará la localización exacta del contenedor si la variable toma valor 1. Por lo cual la solución optima del modelo da la posición exacta de cada contenedor en el buque.

Restricciones:

$$\sum_{l \in L} \sum_{c \in C} x_{lc} = C \quad (2.2)$$

Esta restricción obliga a que la cantidad total de localizaciones asignadas para apilar los contenedores en el buque sea igual al conjunto de contenedores a cargar. Se tiene en cuenta tanto los contenedores de 20' como los de 40'.

$$\sum_{l \in L} x_{lc} \leq 1 \quad \forall c \in C \quad (2.3)$$

Como es usual en los modelos de asignación esta restricción especifica que cada contenedor debe existir como máximo una localización asignada.

$$\sum_{c \in C} x_{lc} \leq 1 \quad \forall l \in L \quad (2.4)$$

Complementando la restricción anterior en esta se especifica que cada localización solo puede tener asignado como máximo un contenedor o en otras palabra que dos contenedores no pueden tener asignada la misma localización.

$$\sum_{l \in L} \sum_{c \in C} w_c x_{lc} \leq Q \quad (2.5)$$

Mediante esta restricción se controla que el peso total de los contenedores que van a ser cargados en el buque no exceda su capacidad máxima.

$$\sum_{c \in T} x_{ijkc} = 0 \quad \forall i \in E, j, k \quad (2.6)$$

Esta es la primera restricción del conjunto de restricciones de tamaño, en la cual se evita que sea asignada una localización con dimensiones de sección de 40' a un contenedor de 20', las secciones de 40' son secciones pares que pertenecen al sub conjunto E.

$$\sum_{c \in F} x_{ijkc} = 0 \quad \forall i \in O, j, k \quad (2.7)$$

De igual forma que en la restricción anterior, en ésta se evita que sean asignadas localizaciones con sección de tamaño 20' a contenedores de 40', en otras palabras localizaciones en donde no cabrán.

$$\sum_{c \in T} x_{i+1,jkc} + \sum_{c \in F} x_{ijkc} \leq 1 \quad \forall i \in E, j, k \quad (2.8)$$

$$\sum_{c \in T} x_{i-1,jkc} + \sum_{c \in F} x_{ijkc} \leq 1 \quad \forall i \in E, j, k \quad (2.9)$$

Como se explicó anteriormente dos secciones impares contiguas de tamaño 20' pueden formar secciones 40' la cuales serán pares. Por esto es necesario introducir estas restricciones en las cuales se evita que sean asignadas aquellas localizaciones

impares contiguas a los contenedores de 20', que previamente han sido elegidas para conformar una sección par, la cual almacenara contenedores de 40'.

$$\sum_{c \in T} x_{i+1,jk+1c} + \sum_{c \in F} x_{ijkc} \leq 1 \quad \forall i \in E, j, k = 1, \dots, |K| - 1 \quad (2.10)$$

$$\sum_{c \in T} x_{i-1,jk+1c} + \sum_{c \in F} x_{ijkc} \leq 1 \quad \forall i \in E, j, k = 1, \dots, |K| - 1 \quad (2.11)$$

Esta otra pareja de restricciones finaliza el conjunto de restricciones de tamaño garantizando que a los contenedores de 20' no le sean asignadas localizaciones que estén por encima de los contenedores de 40'

$$\sum_{c \in T} w_c x_{ijkc} + \sum_{c \in T} w_c x_{ijk+1c} + \sum_{c \in T} w_c x_{ijk+2c} \leq MT \quad \forall i, j, k = 1, \dots, |K| - 2 \quad (2.12)$$

$$\sum_{c \in F} w_c x_{ijkc} + \sum_{c \in F} w_c x_{ijk+1c} + \sum_{c \in F} w_c x_{ijk+2c} \leq MF \quad \forall i, j, k = 1, \dots, |K| - 2 \quad (2.13)$$

Mediante estas restricciones se previene que un pilar de 3 contenedores de 20' o 40' (uno sobre otro) con misma hilera y sección tengan un peso mayor al límite pre establecido para estos como MT y MF respectivamente los cuales usualmente son de 45 y 66 toneladas. Nótese que la restricción tiene en cuenta todos los posibles pilares de tres contenedores.

$$\sum_{\substack{c, e \in C: \\ w_c \neq w_e}} (w_c x_{ijkc} - w_e x_{ijk+1e}) \geq 0 \quad \forall i, j, k = 1, \dots, |K| - 1 \quad (2.14)$$

Con esta restricción se previene que los contenedores más pesados estén siempre por debajo de los contenedores más livianos y se evita también que a un contenedor se le asigne una localización por encima de otra que aún no esté asignada (que esté vacía).

$$\sum_{\substack{c, e \in C: \\ d_c \neq d_e}} (d_c x_{ijkc} - d_e x_{ijk+1e}) \geq 0 \quad \forall i, j, k = 1, \dots, |K| - 1 \quad (2.15)$$

El destino de cada contenedor es clave para definir las localizaciones y por ende el orden en que serán cargados. Con respecto a lo anterior esta restricción evita que un contenedor que tiene que ser descarga primero esté por debajo de un

contenedor que tenga que ser descargado después (esto es que el puerto de destino de un contenedor este siempre después al del contenedor que está por encima de él).

$$-Q_2 \leq \sum_{i \in A, j, k} \sum_c w_c x_{ijkc} - \sum_{i \in P, j, k} \sum_c w_c x_{ijkc} \leq Q_2 \quad (2.16)$$

$$-Q_1 \leq \sum_{i, j \in Z, k} \sum_c w_c x_{ijkc} - \sum_{i, j \in H, k} \sum_c w_c x_{ijkc} \leq Q_1 \quad (2.17)$$

Estas restricciones corresponden al equilibrio transversal y al equilibrio horizontal limitados por Q1 y Q2 respectivamente controlando la distribución de los pesos en el buque.

Modelo:

$$\text{Min } T = \sum_{l \in L} \sum_{c \in C} t_{lc} x_{lc} \quad (2.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{l \in L} \sum_{c \in C} x_{lc} = C \quad (2.2)$$

$$\sum_{l \in L} x_{lc} \leq 1 \quad \forall c \in C \quad (2.3)$$

$$\sum_{c \in C} x_{lc} \leq 1 \quad \forall l \in L \quad (2.4)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{c \in C} w_c x_{lc} \leq Q \quad (2.5)$$

$$\sum_{c \in T} x_{ijkc} = 0 \quad \forall i \in E, j, k \quad (2.6)$$

$$\sum_{c \in F} x_{ijkc} = 0 \quad \forall i \in 0, j, k \quad (2.7)$$

$$\sum_{c \in T} x_{i+1,jkc} + \sum_{c \in F} x_{ijkc} \leq 1 \quad \forall i \in E, j, k \quad (2.8)$$

$$\sum_{c \in T} x_{i-1,jk,c} + \sum_{c \in F} x_{ijk,c} \leq 1 \quad \forall i \in E, j, k \quad (2.9)$$

$$\sum_{c \in T} x_{i+1,jk+1,c} + \sum_{c \in F} x_{ijk,c} \leq 1 \quad \forall i \in E, j, k = 1, \dots, |K| - 1 \quad (2.10)$$

$$\sum_{c \in T} x_{i-1,jk+1,c} + \sum_{c \in F} x_{ijk,c} \leq 1 \quad \forall i \in E, j, k = 1, \dots, |K| - 1 \quad (2.11)$$

$$\sum_{c \in T} w_c x_{ijk,c} + \sum_{c \in T} w_c x_{ijk+1,c} + \sum_{c \in T} w_c x_{ijk+2,c} \leq MT \quad \forall i, j, k = 1, \dots, |K| - 2 \quad (2.12)$$

$$\sum_{c \in F} w_c x_{ijk,c} + \sum_{c \in F} w_c x_{ijk+1,c} + \sum_{c \in F} w_c x_{ijk+2,c} \leq MF \quad \forall i, j, k = 1, \dots, |K| - 2 \quad (2.13)$$

$$\sum_{\substack{c, e \in C: \\ w_c \neq w_e}} (w_c x_{ijk,c} - w_e x_{ijk+1,e}) \geq 0 \quad \forall i, j, k = 1, \dots, |K| - 1 \quad (2.14)$$

$$\sum_{\substack{c, e \in C: \\ d_c \neq d_e}} (d_c x_{ijk,c} - d_e x_{ijk+1,e}) \geq 0 \quad \forall i, j, k = 1, \dots, |K| - 1 \quad (2.15)$$

$$-Q_2 \leq \sum_{i \in A, j, k} \sum_c w_c x_{ijk,c} - \sum_{i \in P, j, k} \sum_c w_c x_{ijk,c} \leq Q_2 \quad (2.16)$$

$$-Q_1 \leq \sum_{i, j \in Z, k} \sum_c w_c x_{ijk,c} - \sum_{i, j \in H, k} \sum_c w_c x_{ijk,c} \leq Q_1 \quad (2.17)$$

$$x_{lc} \in \{0, 1\} \quad \forall l \in L, c \in C \quad (2.18)$$

La función objetivo busca minimizar el tiempo total de apilado T , que no es más que el sumatorio de los tiempos t_{lc} en los cuales se incurren al cargar un contenedor c , $\forall c \in C$, en la localización l , $\forall l \in L$ asignada. Nótese que t_{lc} está dado por la posición en el buque. En la tabla 4 se realiza una clasificación de las referencias consultadas para la elaboración de este apartado.

Tabla 4 Clasificación de las referencias que trabajan el plan de estiba

Trabajo	Modelo	Metodología de resolución	objetivo
Sciomachen y Tanfani (2007)	Proceso algorítmico	Heurística	Minimizar tiempo de estiba
Ambrosino et al (2006)	IP	Heurística	Minimizar tiempo de estiba
Alvarez (2006)	MIP	Heurística + Búsqueda tabú	Minimizar costos de relocalizaciones
Imai et al (2006)	MOIP	Heurística + Algoritmo Genético	Minimizar relocalizaciones
Ambrosino et al (2004)	IP	Heurística	Minimizar tiempo de estiba
Gumus et al (2008)	Proceso algorítmico	Heurística	Minimizar tiempo de estiba

3.2.3. Problema de programación de grúas de muelle “The Quay Crane Scheduling Problem/The Crane Split”

La programación de las grúas de muelle o grúas pórtico (QCSP) se realiza con el principal objetivo de minimizar el tiempo total de operaciones de carga y descarga de cada buque, lo que por ende minimiza el tiempo que estarán estos en la terminal atracados. Al resolver el QCSP se debe obtener la siguiente información:

- Cantidad de grúas que atenderán a cada buque en las operaciones de carga y descarga.
- El tiempo que permanecerá cada grúa asignada a un buque.
- Cuál será la secuencia de tareas que realizará cada grúa (como cargar y descargar).
- Como estarán distribuidas las grúas asignadas a lo largo del buque (una grúa por sección).

Peterkofsky y Daganzo, (1990) afirman que un buque de carga pasa el 60% de su vida útil en puerto, por lo tanto existe la necesidad de minimizar este tiempo, aumentando el rendimiento del muelle y la disminución de las demoras operativas. Para construir el modelo consideran un buque tipo portacontenedores, teniendo cada bodega una parte del trabajo a realizar y tomando el rendimiento de las grúas como constante, programan la operatividad del buque como un taller con n maquinas idénticas en paralelo (las grúas) que trabajan en varias bodegas, con trabajos independientes, de una sola etapa y preestablecidos. En la práctica esto

implica pocos buques y muchas bodegas, en consecuencia la programación es muy compleja para mantener la eficiencia global operativa. Se busca que las grúas mantengan la eficiencia global y minimizar el coste por demoras mediante una ponderación de las mismas y una pre-asignación de las tareas de cada grúa.

En la literatura se encuentran diferentes trabajos relacionados a la programación de grúas pórtico, si bien se pueden identificar enfoques predominantes. Autores como Zhang y Kim (2008), Moccia et al (2005), Jung et al (2006a), Ng y Mak (2006) y Tavakkoli-Moghaddam et al (2008) dan gran importancia a determinar la secuencias de tareas que deben realizar cada grúa pórtico, con el objetivo de minimizar tiempo. En otros trabajos son propuestas nuevas estrategias para la carga y descarga, Goodchild y Daganzo (2006; 2007) consideran un nuevo método llamado doble ciclo, en el que se busca minimizar los movimientos sin contenedores realizados por las grúas pórticos (carga y descarga de contenedores simultanea). Al estar todas sobre las mismas vías para el desplazamiento, autores como Zhu y Lim (2004), Lim et al (2004) y Lee et al (2006a) tienen en cuenta la interferencia entre las grúas pórtico.

Para resolver este problema es necesario tener indicadores de movimientos de grúa/hora, ya que estos darán los datos de entrada al modelo. En la figura 16 se muestran tres grúas pórtico asignadas a diferentes secciones de un buque.

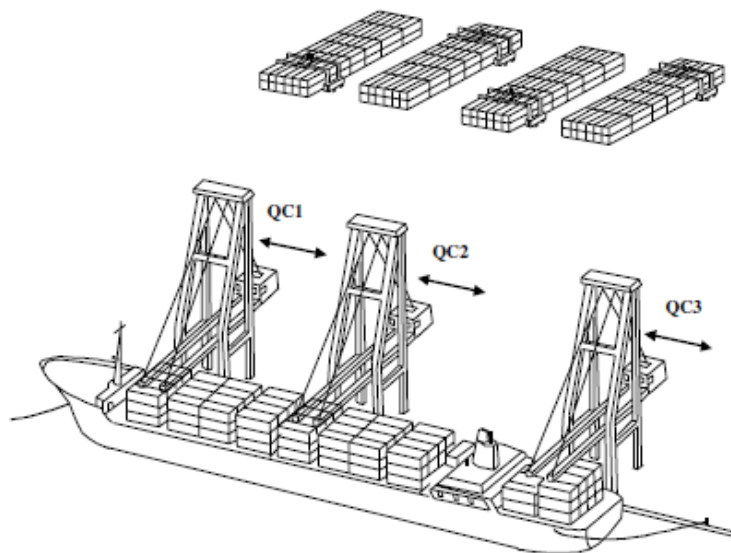


Figura 16. Grúas pórtico de muelle en operación
Fuente: Kim et al (2004b)

Kim et al (2004b) realizan un estudio del problema de programación de grúas de muelles en el cual determinan la secuencia de operaciones de descarga y carga de contenedores que efectuara una grúa de manera que el tiempo total de operaciones de buque sea minimizado. Para cumplir con el objetivo de minimizar todos los tiempos de servicio de la operación (*makespan*) los autores tiene en cuenta unas consideraciones operativas tales como:

- Definen como *cluster* el conjunto de espacios vacíos adyacentes en el buque en los cuales van a ser ubicados los contenedores de igual grupo que se planean cargar.
- Definen una tarea como la operación de descarga y carga de un *cluster*.
- Asumen que cuando una grúa comienza a cargar (descargar) contenedores a (de) un *cluster*, está continúa haciéndolo hasta que todos los espacios del *cluster* estén llenos (vacíos).
- Si se deben realizar operaciones de descarga y carga en una misma sección del buque (*bay-ship*), las operaciones de descarga deben preceder las operaciones de carga.
- Cuando se realiza la descarga de contenedores de en una sección del buque, las tareas de la cubierta deben ser realizadas antes que las tareas de la bodega de la misma sección. Por lo tanto establecen relaciones de precedencia entre los *cluster*.

Establecen de igual forma restricciones operativas de las grúas pórtico cuando se presentan tareas simultáneas ya que las grúas de muelle viajan por las mismas vías, algunas de estas son:

- Algunos pares de tareas no pueden ser realizadas simultáneamente si la localización de los dos *clusters* correspondientes a esas tareas es adyacente ya que las grúas pórtico deben estar separadas unas de otras como mínimo por una sección del buque
- En cuanto a las grúas pórtico de almacenamiento restringe que si los contenedores de ciertos pares de tareas deben ser tomados o colocados en una misma localización en la explanada, las dos tareas no pueden ser llevadas a cabo simultáneamente porque causarían interferencias, bloqueos o colas en la grúa de la explanada.
- Cada grúa de muelle puede operar justo después del momento en que quede libre.

Modelo QCSP

Parámetros

- J** Conjunto de tareas a ser realizadas tal que, $j \in J, k \in J, j \neq k$. Estas son numeradas incrementalmente de acuerdo a su relativa localización con respecto a la numeración de las secciones de los buques (en el mismo sentido)
- I** Conjunto de grúas tal que $i \in I$. Éstas son numeradas incrementalmente de acuerdo a su relativa localización con respecto a la numeración de las secciones de los buques (en el mismo sentido)
- S** Conjunto de tareas pares que no pueden realizadas simultáneamente. Cuando la tarea j y la k no puedan ser realizadas simultáneamente, $(j, k) \in S$
- P** Conjunto de pares ordenados de tareas entre las cuales hay una relación de precedencia. Cuando la tarea j deba preceder la tarea k , $(j, k) \in P$

Datos:

- t_j** Tiempo requerido para realizar la tarea j
- r_i** Primer instante de tiempo en que la grúa i queda disponible
- l_i** Localización de la tarea i (expresado por el numero de la sección del buque)
- l_i^0** Posición en que la grúa i inicia operaciones. Esta es expresada por el numero de sección del buque
- l_i^N** Posición en que la grúa i finaliza operaciones. Esta es expresada por el número de sección del buque. Esta posición final puede ser especificada si el trabajo para el siguiente buque ya está asignado a la grúa i .
- t_{jk}** Tiempo que tarda la grúa en desplazarse de la localización de la tarea i (l_i) a la localización de la tarea j (l_j).
- G** Representa una constante lo suficientemente grande
- α_1** Peso para el tiempo total de operación
- α_2** Peso para el tiempo total en que terminan las grúas

Variables:

- X_{ijk}** Variable binaria que toma el valor de 1, si la grúa i realiza la tarea k inmediatamente después de haber realizado la tarea j ; 0, de otra forma. La tarea 0 y la tarea N serán consideradas como los estados inicial y final para cada grúa, respectivamente. Por lo tanto, cuando la tarea k sea la primera tarea de la grúa i X_{i0k} será igual a 1. También, cuando la tarea k sea la última

- tarea de la grúa i , X_{ikN} será igual a 1
- T_i Variable continua que representa el tiempo total de trabajo de la grúa i
- T_j Variable continua que representa el tiempo total de trabajo que se usa en la tarea j
- Z_{jk} Variable binaria que toma el valor de 1, si la tarea k comienza después de que se ha completado el tiempo de la tarea j ; 0, de otra forma.
- W Variable continua que representa el tiempo durante el cual todas las tareas son completadas.

Restricciones:

$$T_i \leq W \quad \forall i = 1, \dots, I, \quad (3.2)$$

Esta restricción garantiza que el tiempo de operación de cada grúa no sea mayor que el tiempo de operación total.

$$\sum_{k \in J} X_{i0k} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, I, \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in J} X_{ijN} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, I, \quad (3.4)$$

Con estas restricciones se determina cual va a ser la tarea inicial y la tarea final que realizara cada uno de las grúas i .

$$\sum_i \sum_{j \in J} X_{ijk} = 1 \quad \forall k \in J, \quad (3.5)$$

Con esta restricción se asegura que todas las tareas k sean completadas exactamente por una grúa, en otras palabras para cada tarea sólo, puede haber una grúa asignada.

$$\sum_k X_{ijk} - \sum_k X_{ikj} = 0 \quad \forall j \in J, \forall i = 1, \dots, I, \quad (3.6)$$

Esta restricción es una restricción de balance de flujo la cual garantiza que las tareas sean realizadas según la secuencia.

$$T_j + t_{jk} + t_k - T_k \leq G(1 - X_{ijk}) \quad \forall i, j \in J, \forall i = 1, \dots, I, \quad (3.7)$$

Mediante esta restricción simultáneamente se determina el tiempo en que se completará cada tarea como también se definen las secuencias.

$$T_j + t_k \leq T_k \quad \forall (j, k) \in P, \quad (3.8)$$

Esta restricción garantiza que si son realizadas el par de tareas (j, k) entre las cuales hay una relación de precedencia, la tarea j puede ser completada antes que la tarea k .

$$T_j - T_k + t_k \leq G(1 - Z_{jk}) \quad \forall i, j \in J \quad (3.9)$$

Esta restricción define Z_{jk} tal que $Z_{jk} = 1$ solo si el inicio de la operación de la tarea k comienza después que se ha completado el tiempo de operación de la tarea j ; 0, de otra forma.

$$Z_{jk} + Z_{kj} = 1 \quad \forall (j, k) \in S, \quad (3.10)$$

Esta restricción garantiza que la tarea j y k no puedan ser realizadas simultáneamente cuando $(j, k) \in S$.

$$\sum_{v=1}^i \sum_{u \in J} X_{vuk} - \sum_{v=1}^i \sum_{u \in J} X_{vuj} \leq G(Z_{jk} + Z_{kj}) \quad \forall j, k \in J, l_j < l_k, \forall i = 1, \dots, I, \quad (3.11)$$

Esta restricción es una de las más importantes porque evita la interferencia entre las grúas, ya que por ejemplo, si la tarea j y k son realizadas simultáneamente y $l_j < l_k$. Significa que $Z_{jk} + Z_{kj} = 0$. Nótese que ambas grúas y tareas son numeradas con un orden incremental con respecto a su localización y corresponde a la numeración de las secciones del buque.

$$D_k + t_{kN}^i - T_i \leq G(1 - X_{ikN}) \quad \forall j \in J, \forall k = 1, \dots, I, \quad (3.12)$$

Mediante esta restricción se define el tiempo total en que cada grúa termina las tareas asignadas

$$r_i - D_k + t_{0k}^i + p_k \leq G(1 - X_{i0k}) \quad \forall j \in J, \forall i = 1, \dots, I, \quad (3.13)$$

Con esta restricción se controla el momento más pronto en que cada grúa comienza a realizar operaciones.

Modelo:

$$\text{Minimizar } \alpha_1 W + \alpha_2 \sum_{i=1}^I T_i \quad (3.1)$$

Sujeto a:

$$T_i \leq W \quad \forall i = 1, \dots, I, \quad (3.2)$$

$$\sum_{k \in J} X_{i0k} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, I, \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in J} X_{ijN} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, I, \quad (3.4)$$

$$\sum_i \sum_{j \in J} X_{ijk} = 1 \quad \forall k \in J, \quad (3.5)$$

$$\sum_k X_{ijk} - \sum_k X_{ikj} = 0 \quad \forall j \in J, \forall i = 1, \dots, I, \quad (3.6)$$

$$T_j + t_{jk} + t_k - T_k \leq G(1 - X_{ijk}) \quad \forall i, j \in J, \forall i = 1, \dots, I, \quad (3.7)$$

$$T_j + t_k \leq T_k \quad \forall (i, j) \in P, \quad (3.8)$$

$$T_j - T_k + t_k \leq G(1 - Z_{kj}) \quad \forall i, j \in J \quad (3.9)$$

$$Z_{kj} + Z_{jk} = 1 \quad \forall (i, j) \in S, \quad (3.10)$$

$$\sum_{v=1}^i \sum_{u \in J} X_{vuk} - \sum_{v=1}^i \sum_{u \in J} X_{vuj} \leq G(Z_{jk} + Z_{kj}) \quad \forall j, k \in J, l_j < l_k, \forall i = 1, \dots, I, \quad (3.11)$$

$$D_k + t_{kN}^i - T_i \leq G(1 - X_{ikN}) \quad \forall j \in J, \forall k = 1, \dots, I, \quad (3.12)$$

$$r_i - D_k + t_{0k}^i + p_k \leq G(1 - X_{i0k}) \quad \forall j \in J, \forall i = 1, \dots, I, \quad (3.13)$$

$$X_{ijk}, Z_{kj} = \{0, 1\} \quad \forall j, k \in J, \forall i = 1, \dots, I, \quad (3.14)$$

$$T_i, T_j \geq 0 \quad \forall j \in J, \forall i = 1, \dots, I, \quad (3.15)$$

El modelo tiene una función objetivo multi-criterio y los autores asumen que $\alpha_1 \gg \alpha_2$, porque la minimización de los tiempos de operación y/o servicio es considerada más importante que la minimización del tiempo total en que se completan las tareas. Esta suposición es válida porque un buque puede salir solo después de que todas las grúas asignadas a éste completen todas las tareas programadas y la pronta salida es el principal objetivo de la programación de grúas de muelle.

Esta operativa es una de las más importantes en la terminales de contenedores portuarias ya que las grúas pórtico pueden ser catalogadas como la maquinaria de manipulación más costosa de la terminal, además de ser la única maquinaria que permite realizar las operaciones de carga y descarga de contenedores en el transporte marítimo. La óptima gestión de estas permite que la mayor cantidad de grúas puedan estar disponibles para ser asignadas a otros buques. En la tabla 5 se realiza una clasificación de las referencias más relevantes en la programación de grúas pórtico entre las que fueron consultadas para elaborar este apartado.

Tabla 5 Clasificación de las referencias que trabajan la programación de grúas pórtico

Trabajo	Modelo	Metodología de resolución	Objetivo
Liu et al (2006)	MIP	Heurística	Minimizar tiempos
Zhang y Kim (2008)	MIP	Heurística	Minimizar tiempos
Peterkofsky y Daganzo (1990)	LP	Heurística	Minimizar tiempos
Moccia et al (2005)	MIP	Heurística	Minimizar tiempos
Kim y Park (2004)	MIP	Heurística	Minimizar tiempos
Jung et al (2006)	Proceso algorítmico	Heurística	Minimizar tiempos
Tavakkoli-Moghaddam et al (2008)	MIP	Heurística + Algoritmo Genético	Minimizar costos
Goodchild y Daganzo (2006)	LP	Heurística	Minimizar tiempos
Goodchild y Daganzo (2007)	Modelo de simulación	Simulación	Evaluar estrategias
Ng y Mak (2006)	IP	Heurística	Minimizar tiempos
Lee et al (2008)	MIP	Heurística + Algoritmo Genético	Minimizar tiempos
Daganzo (1989)	IP	Métodos Exactos	Minimizar tiempo de espera
Lim et al (2004)	Proceso algorítmico	Heurística	Minimizar tiempo de espera
Zhu y Lim (2004)	IP	Heurística	Minimizar tiempo de espera

3.3. Operativa de almacenaje y apilado

“Storage and Stacking logistics”

En los últimos años la zona de almacenaje de contenedores en las TCP se ha convertido en un recurso crítico pues son cada vez más la cantidad de contenedores que transitan por las terminales. El crecimiento de los flujos de negocios y la adaptación de las líneas navieras a las demandas del mercado del transporte marítimo han ocasionado que muchas terminales dejen de ser competitivas.

Por lo general las TCP han sido rodeadas por industrias y ciudades enteras siendo imposible aumentar el tamaño de su zona de almacenamiento dejando como únicas soluciones la adquisición de maquinaria cada vez más moderna que pueda movilizar grandes volúmenes de contenedores rápidamente y optimizar la operativa de almacenado la cual está dividida en dos sub-sistemas que son:

- La localización de los contenedores en la zona de almacenaje
- La relocalización de contenedores en la zona de almacenaje

Estos dos sub-sistemas engloban diferentes aspectos como la programación de grúas, la asignación de espacio, etc. los cuales deben ser gestionados de forma optima para así mantener el rendimiento de las TCP. A continuación se explican estos sub-sistemas.

3.3.1. Localización de contenedores en la zona de almacenamiento “The Yard Allocation Problem”

Decidir en qué lugar de la zona de almacenaje será ubicado un contenedor después de ser descargado de un medio de transporte ya sea marítimo o terrestre depende de diferentes aspectos tales como:

- Tamaño
- Buque asignado
- Destino
- Tipo
- Peso
- Clase
- Fecha de salida

Todos estos aspectos son tenidos en cuenta al momento de decidir la localización de los contenedores en la zona de almacenamiento (*Yard Allocation Problem - YAP*) ya que una buena localización disminuirá los movimientos internos (relocalizaciones).

El YAP es abordado desde diferentes enfoques en la literatura. Lim y Xu (2006), Chen et al (2003), Chen et al (2004) y Chen et al (2002) buscan minimizar la utilización de la zona de almacenaje, maximizando la utilización de cada parte de la ZA. Para esto buscan localizar la mayor cantidad de contenedores en un mismo espacio. Pero autores como Lee et al (2006b), Kim y Kim (1998), Kim et al (2000), Kang et al (2006) prefieren asignar las localizaciones de los contenedores en la ZA minimizando costes de desplazamientos y de relocalizaciones futuras, ya que un almacenaje de los contenedores en una misma zona de la ZA ocasionaría gran cantidad de movimientos para poder movilizar cada contenedor.

Zhang et al (2003) considera que una gestión operativa eficiente en una terminal de contenedores es determinante para reducir costes de transporte y un mejor ajuste a la programación de los buques. Analiza el espacio necesario de almacenamiento y la ubicación de los contenedores teniendo en cuenta los recursos (espacio, grúas, y maquinaria de explanada), las escalas de los buques y las distancias. Los autores optimizan las cargas de trabajo de todo el sistema, mediante aproximaciones de horizontes rodantes temporales.

Kim et al (2003b) sugieren una metodología de pre-localización de los espacios en la explanada para la llegada de los contenedores salientes (de exportación) de manera que se logre maximizar la eficiencia en las operaciones de carga. Dividen los procesos para determinar las localizaciones en la explanada de los contenedores salientes en dos etapas:

- La primera es la localización de espacios en la cual se determina la cantidad de espacios en cada bloque, en los cuales serán localizados los contenedores que lleguen en cada buque, esta se debe planificar semanalmente, diariamente o siempre que un buque salga del muelle, las futuras llegadas de buques y los flujos de salida y entrada de los contenedores deben ser tenidos en cuenta
- La segunda etapa es la localización individual de los contenedores, en la cual se planifican los lugares exactos en que se almacenaran estos, los lugares se identifican por número de bloque, sección, hilera y nivel.

Los autores solo resuelven el problema de localización de contenedores en la explanada de la primera etapa, la localización individual de los contenedores es resuelto en Kim et al (2000). Para esta etapa tienen en cuenta las siguientes consideraciones para la realización del modelo matemático:

- El espacio que está desocupado durante una etapa estará disponible solo hasta el final de esa etapa. Esto implica que el espacio que deja un buque saliente estará disponible solo hasta después de que todas las operaciones de carga sean completadas.
- La cantidad de contenedores que llegan para todos los buques en el horizonte de tiempo es determinada y conocida. Esto es que para todas las etapas durante todo el horizonte de planificación son utilizadas cantidades determinadas y conocidas de contenedores que llegan.
- Los equipos de la explanada solo pueden manipular un contenedor al tiempo.
- Los costes de las carretillas pórtico o de las grúas pórtico de explanada dentro de un bloque no son considerados ya que la localización de los contenedores dentro de estos bloques no son indicados por el trabajo.

Para diseñar el modelo clasifican algunos elementos de la función objetivo al igual que las restricciones en obligatorios y opcionales de manera que el modelo sea flexible para diferentes situaciones.

Modelo para el YAP

Parámetros:

- B*** Conjunto de buques a los cuales se les debe asignar un espacio durante el horizonte de planeación
- e*** Numero de etapas. El periodo de tiempo que está entre dos salidas de buque consecutivas es llamado una etapa
- N*** Conjunto de bloques

Datos:

- B_j*** Conjunto de buques para los cuales el espacio es ocupado o asignado en la etapa *j*
- G*** Un numero constante lo suficientemente grande
- E_i*** Conjunto de etapas en que se le debe asignar los espacios al buque *i*

- b_i Máximo número de bloques de contenedores que pueden ser apilados dentro del buque i
- Q_k Capacidad máxima de apilado del bloque k
- c_{ij} Número de contenedores salientes para el buque i , los cuales llegaran a la terminal durante la etapa j .
- p_1 Coste de viaje de los equipos de la explanada por contenedor y por unidad de distancia entre el muelle y los grupos de contenedores en la explanada
- S_{ik} Distancia de viaje que recorre el equipo de explanada entre la localización de atraque del buque i y el bloque de contenedores k
- $S_{k_1k_2}$ Distancia de viaje que recorre el equipo de la explanada entre el bloque k_1 y el k_2
- Z_{i0k} Número inicial de contenedores que están apilados en el bloque k y que serán cargados dentro del buque i

Variables:

- Z_{ijk} Variable continua que representa el espacio del bloque k asignado a los contenedores que llegan en el buque i durante la etapa j
- δ_{ik} Variable binaria que toma el valor de 0 si $Z_{ijk} = 0 \forall j \in E_i$; 1 de otra forma

Restricciones:

$$\sum_{i \in B_j} \left(Z_{i0k} + \sum_{n \in E_i, n \leq j} Z_{ink} \right) \leq Q_k \quad \forall j = 1, 2, \dots, e \quad \forall k \in N \quad (4.2)$$

Esta restricción limita el espacio disponible en los bloques de la ZA ya que la sumatoria de los espacios que se encuentran ocupados por contenedores y los espacios asignados a un buque de un mismo bloque k no pueden exceder la capacidad de este bloque para cada etapa j .

$$\sum_{k \in N} Z_{ijk} = c_{ij}, \quad \forall j = 1, 2, \dots, e \quad \forall i \in B \quad (4.3)$$

Con esta restricción se garantiza que todos los contenedores de salida tengan asignado un espacio para su almacenamiento en alguno de los bloques k esto para cada etapa y cada buque.

$$\sum_{j \in E_i} Z_{ijk} \leq G \delta_{ik}, \quad \forall i \in B, k \in N \quad (4.4)$$

$$\sum_{k \in N} \delta_{ik} \leq b_i \quad \forall i \in B \quad (4.5)$$

Estas dos restricciones son para este modelo opcionales, ya que limitan el número total de bloques usados para cada buque de manera que en la restricción (4.4) se define la variable binaria δ_{ik} ; que tomara el valor de 1 cada vez que la variable Z_{ijk} también tome valor 1. Que es complementado con la restricción (4.5) la cual limita el número de bloques asignados el buque i con b_i ya que el sumatorio de todos los δ_{ik} debe ser menor o igual a esta cota.

Modelo

$$\text{Min } 2p_1 \sum_{i \in B} \sum_{k \in N} S_{ik} \left(Z_{i0k} + \sum_{j \in E_i} Z_{ijk} \right) \quad (4.1)$$

Sujeto a

$$\sum_{i \in B_j} \left(Z_{i0k} + \sum_{n \in E_i, n \leq j} Z_{ink} \right) \leq Q_k \quad \forall j = 1, 2, \dots, e \quad \forall k \in N \quad (4.2)$$

$$\sum_{k \in N} Z_{ijk} = c_{ij}, \quad \forall j = 1, 2, \dots, e \quad \forall i \in B \quad (4.3)$$

$$\sum_{j \in E_i} Z_{ijk} \leq G \delta_{ik}, \quad \forall i \in B, k \in N \quad (4.4)$$

$$\sum_{k \in N} \delta_{ik} \leq b_i \quad \forall i \in B \quad (4.5)$$

$$Z_{ijk} \geq 0 \text{ y entera} \quad (4.6)$$

La función objetivo busca minimizar los costes de transferencia en que se incurren al realizar las operaciones de carga del buque i por la maquinaria de manipulación. Estos costes dependen del lugar de localización de los grupos de contenedores y la localización del muelle asignado donde atracara el buque. Estas dos localizaciones darán la distancia que debe recorrer cada uno de los contenedores que será cargado o descargado del buque.

Como se explico anteriormente los autores solo tiene en cuenta la localización de los contenedores en los diferentes bloques de la ZA, sin conseguir la localización específica dentro de estos bloques. Al igual que ellos muchos trabajos dividen esta operativa debido a su gran complejidad. En la tabla 6 se realiza una clasificación de las referencias más relevantes en la localización de contenedores en la ZA entre las que fueron consultadas para elaborar este apartado.

Tabla 6 Clasificación de los trabajos sobre la localización de contenedores en la ZA

Trabajo	Modelo	Metodología de resolución	objetivo
Kim y Park (2003)	MIP	Heurística	Minimizar costos
Zhang et al (2003)	IP	Métodos Exactos	Minimizar distancias
Lim y Xu (2006)	Proceso algorítmico	Metaheurística	Minimizar utilización del recurso
Dekker et al (2006)	Modelo de simulación	Simulación	Evaluar estrategias
Lee et al (2006)	MIP	Métodos Exactos	Minimizar costos
Kang et al (2006)	Proceso algorítmico	Heurística	Minimizar relocalizaciones
Kozan y Preston (2006)	Proceso algorítmico	Heurística	Minimizar tiempos
Chen et al (2004)	Proceso algorítmico	Metaheurística	Minimizar utilización del recurso
Chen et al (2003)	Proceso algorítmico	Metaheurística	Minimizar utilización del recurso
Chen et al (2002)	Proceso algorítmico	Heurística	Minimizar utilización del recurso
Castillo y Daganzo (1993)	Proceso algorítmico	Heurística	Evaluar estrategias
Taleb-Ibrahimi et al (1993)	Proceso algorítmico	Heurística	Evaluar estrategias
Kim et al (2000)	Proceso algorítmico	Heurística	Minimizar relocalizaciones
Kim y Kim (1998)	Proceso algorítmico	Heurística	Minimizar costos

3.3.2. Relocalización de contenedores “The container pre-marshalling problem”

En la zona de almacenaje es necesaria una constante relocalización de los contenedores (*Container Pre-Marshalling Problem - CPMP*) ya que un óptimo apilamiento puede facilitar el desarrollo de otros procesos como la carga de contenedores a los diferentes modos de transporte. Lo cual se convierte en su principal objetivo.

En la relocalización de contenedores se tienen en cuenta algunas características como: puerto de destino, tamaño, peso, etc. Estas se toman como criterio para asignar su nueva ubicación en la ZA. En la literatura se encuentran diferentes trabajos relacionados a la relocalización de contenedores cada uno de los cuales considera diferentes situaciones. Un ejemplo de una reubicación de contenedores se da cuando un contenedor *A* con una fecha de salida próxima, está debajo de contenedores *B* con fecha de salida posterior al *A*, lo que implica que deben ser relocalizados los contenedores *B* de manera que el contenedor *A* quede libre y pueda ser cargado a su medio de transporte.

Lee y Chao (2009) tienen en cuenta de igual forma las fechas de salida de los contenedores. Los enumeran en forma ascendente de manera que los primeros números representan los contenedores con fecha de salida más cercana. Establecen una heurística la cual se conforma por dos subrutinas principales y tres secundarias; en la primera se establece la trayectoria para que los contenedores de menor número estén por encima de los de mayor número. Posteriormente mediante programación lineal entera en la segunda subrutina es elegida la que menor cantidad de movimientos requiere teniendo en cuenta las restricciones de altura de los pilares y los conflictos entre estas. Un movimiento es expresado como (3:4,1) que significa que el contenedor 3 es reubicado del pilar 4 al pilar 1.

Yang y Kim (2006) Proponen un método para minimizar la relocalización de ítems, en donde un ítem representa un contenedor. Definen como SDU (unidad de demanda almacenada), los contenedores ya apilados en la ZA que no necesitan ser reubicados para poder ser tomados, y como SSU (unidad de espacio suministrado) a la cantidad mínima de espacios que se deben proporcionar a un SDU, el objetivo es minimizar las relocalizaciones que permiten agrupar los contenedores con igual características.

Lee y Hsu (2007a) proponen un modelo de flujo en redes de programación entera para resolver el problema de pre-agrupación de contenedores. Este problema es una operativa derivada de la relocalización de contenedores en la zona de explanada ya que al optimizarlo se obtiene un plan de relocalización de contenedores dentro de la ZA. El objetivo es minimizar el número de contenedores movidos en el proceso de pre-agrupación para preparar los contenedores para la operación carga a buque. Para esto tienen en cuenta las siguientes consideraciones.

- La pre-agrupación se realiza en el mismo bloque de contenedores. Por lo cual también se considera que sólo se necesita una grúa RTG.

- Los contenedores de diferente tamaño son almacenados en diferentes pilares por lo cual asumen que todos los contenedores son del mismo tamaño.
- Sólo es atendido un barco por grúa y por bloque de contendores. Por lo cual no se considera posible que dos o más barcos en el mismo instante de tiempo sean cargados con contenedores localizados en el mismo bloque y por la misma grúa.
- La programación de la carga de los contenedores es conocida.

Los autores miden la cantidad de trabajo en términos del número de movimientos en la secuencia para realizar la pre-agrupación de los contenedores. Teniendo como objetivo minimizar el número de movimientos requeridos para transformar la distribución de los contenedores en la explanada de la situación inicial a la situación final (óptima). En la figura 17 se puede ver la representación de una solución admisible.

En la figura 17 los nodos corresponden a los espacios donde se almacenan los contenedores, los arcos corresponden a los posibles movimientos que pueden realizar los contenedores y el flujo de la red representa los movimientos de los contenedores en los espacios de tiempo. Cada rectángulo representa un pilar de contenedores en donde un par de nodos en un mismo nivel es un espacio para localizar un contenedor; los nodos derechos son nodos de entrada y los izquierdos de salida. Se tiene un nodo origen el cual tiene como objetivo dar la situación actual de la explanada y un nodo final que da la nueva situación ya optimizada.

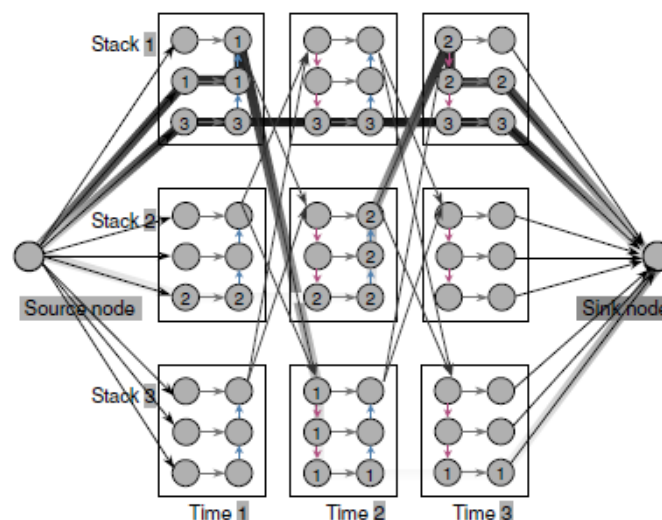


Figura 17. Ilustración de una posible solución

Fuente: Lee y Hsu (2007a)

Se tendrán cinco tipos de arcos los cuales son todos orientados y se hace referencia a ellos cuando conectan el nodo a con el nodo b como el arco (a,b) . Estos son:

- Arco ascendente: es aquel que va de un nodo de salida ubicado en el espacio h a otro nodo de salida ubicado en el espacio $h+1$ del mismo pilar p , que se representaría como $(S_{tp h}, S_{tp(h+1)})$.
- Arco descendente: es aquel que va de un nodo de entrada ubicado en el espacio h a otro nodo de entrada ubicado en el espacio $h-1$ del mismo pilar p . Este se representa como $(E_{tp h}, E_{tp(h-1)})$.
- Arco interno: este arco no representa ningún movimiento ya que une el nodo de entrada y el nodo de salida del mismo espacio h , el mismo instante de tiempo t y en el mismo pilar p , este se representa como $(E_{tp h}, S_{tp h})$.
- Arco estático: se le llama así ya que representa un contenedor que después de pasar del tiempo t al tiempo $t+1$ sigue en el mismo espacio h y en el mismo pilar p , representado como $(S_{tp h}, E_{(t+1)p h})$.
- Arco de movimiento: es aquel que conecta un nodo superior de salida del espacio H , del pilar p , en el tiempo t con un nodo de entrada superior del espacio H , del pilar z y en el tiempo $t+1$, esto es representado como $(S_{tp H}, E_{(t+1)z H})$ H representa los nodos superiores de cada bloque por donde entran y salen los contenedores. En otras palabras este arco representa el movimiento de un contenedor de un pilar a otro.

Modelo CPMP

Parámetros:

- C** Conjunto total de contenedores en donde $c = 1, \dots, C$
 T Conjunto de segmentos de tiempo en donde $t = 1, \dots, T$
 P Conjunto de pilares $p = 1, \dots, P$
 H Conjunto de los posibles espacios en donde $h = 1, \dots, H$
 MH Máxima altura de los diferentes pilares

Datos:

- CI_{ph}** Con valor 1 si el espacio h en el pilar p tiene un contenedor c en la situación inicial
 CF_{ph} Con valor 1 si el espacio h en el pilar p tiene un contenedor c en la situación final

CM_t Número total de contenedores que deben ser movidos en la explanada durante el tiempo t

Variables:

- $c_{a_{tph}}$ Variable binaria que toma el valor de 1 Si el contenedor c circula por el arco de ascendente $a = (S_{tp_h}, S_{tp(h+1)})$ y 0 de otra forma
- $c_{d_{tph}}$ Variable binaria que toma el valor de 1 Si el contenedor c circula por el arco de descendente $d = (E_{tp_h}, E_{tp(h-1)})$ y 0 de otra forma
- $c_{i_{tph}}$ Variable binaria que toma el valor de 1 Si el contenedor c esta sobre el arco interno $i = (E_{tp_h}, S_{tp_h})$ y 0 de otra forma
- $c_{e_{tp_h}}$ Variable binaria que toma el valor de 1 Si el contenedor c circula por el arco estático $e = (S_{tp_h}, E_{(t+1)ph})$ y 0 de otra forma
- $c_{m_{tpz}}$ Variable binaria que toma el valor de 1 Si el contenedor c circula por el arco de movimiento $m = (S_{tp_H}, E_{(t+1)zH})$ y 0 de otra forma
- $c_{o_{ph}}$ Variable binaria que toma el valor de 1 Si el contenedor c circula por el arco origen $o = (Nodo\ Origen, E_{1ph})$ y 0 de otra forma
- $c_{u_{ph}}$ Variable binaria que toma el valor de 1 Si el contenedor c circula por el arco ultimo $u = (S_{Tph}, Nodo\ ultimo)$ y 0 de otra forma

Restricciones:

Para entender el modelo se debe recordar que éste se basa en un modelo de redes, por lo tanto muchas situaciones serán modeladas como flujo en la red pese a que no condicionen movimientos concretos.

$$\sum_{c \in C} c_{i_{tp_h}} \geq \sum_{c \in C} c_{i_{tp(h+1)}} \quad \forall t \in T, p \in P, h \in H, h \neq MH \quad (5.2)$$

Como se explico un contenedor c localizado en un espacio h ocupa dos nodos el de entrada y el de salida, los cuales están unidos por un arco interno i . En esta restricción se garantiza que sólo se pueda localizar un contenedor en la ubicación $(h+1)$ si en la ubicación h ya está ocupada por otro contenedor. Tomando como base un análisis de redes se diría que solo puede existir flujo en el arco interno del tiempo t , el pilar p y el espacio $h+1$ si existe flujo en el arco interno del mismo tiempo y pilar pero del espacio h .

$$c_{a_{tp_h}} \leq c_{a_{tp(h+1)}} \quad \forall c \in C, t = 1, \dots (T-1), p \in P, h = 1, \dots (MH-2). \quad (5.3)$$

Con esta restricción se garantiza que no exista flujo en el arco de acenso para el contenedor c si el contenedor que está por encima de él no ha sido quitado. En otras palabras que no puede ser tomado ningún contenedor que esté en medio de un pilar por ende que tenga contenedores sobre él.

$$\sum_{c \in C} c_{i_{tp(h+1)}} + \sum_{c \in C} c_{a_{tph}} \leq 1 \quad \forall t = 1, \dots, (T-1), p \in P, h \in H, h \neq MH \quad (5.4)$$

Esta restricción complementa la (5.3) ya que garantiza que si se genera flujo de acenso para el contenedor c que está en el espacio h no exista un flujo interno del contenedor c en el espacio $h+1$. En otras palabras que si un contenedor c va a ser tomado no existe sobre el ningún otro contenedor.

$$\sum_{p \in P} \sum_{z \in P, p \neq z} \sum_{c \in C} c_{m_{tph}} \leq 1 \quad \forall t = 1, \dots, (T-1) \quad (5.5)$$

De acuerdo con las consideraciones anteriores sólo se está manejando un bloque de contenedores y una grúa por lo cual con esta restricción se garantiza que sólo exista (se realice) un movimiento de contenedor para cada segmento de tiempo.

$$\sum_{c \in C} c_{a_{tph}} \leq 1 \quad \forall t = 1, \dots, (T-1), p \in P, h \in H, h \neq MH \quad (5.6)$$

$$\sum_{c \in C} c_{i_{tph}} \leq 1 \quad \forall t \in T, p \in P, h \in H \quad (5.7)$$

$$\sum_{c \in C} c_{d_{tph}} \leq 1 \quad \forall t \in T, T \neq 1, p \in P, h \in H, h \neq 1. \quad (5.8)$$

$$\sum_{c \in C} c_{e_{tph}} \leq 1 \quad \forall t = 1, \dots, (T-1) p \in P, h \in H \quad (5.9)$$

$$\sum_{c \in C} c_{m_{tpz}} \leq 1 \quad \forall t = 1, \dots, (T-1), p, z \in P, p \neq z \quad (5.10)$$

Estas siete restricciones que van de la (5.6) a la (5.10) evalúan las siete variables binarias de forma individual, debido a que se hace necesario restringir el flujo de manera que solo pueda existir por cada arco el flujo de una sola unidad. En otras palabras que sólo se pueda estar realizando operaciones de relocalización de un contenedor por cada segmento de tiempo.

$$CI_{ph} = c_{i_{1ph}} \quad \forall c \in C, p \in P, h \in H. \quad (5.11)$$

Mediante esta restricción se ingresan los contenedores a la red de forma que se establecen cuales son los arcos internos para el primer segmento de tiempo que tendrán flujo (se ingresan los datos del estado inicial de la explanada).

$$CF_{ph} = c_{i_{Tph}} \quad \forall c \in C, p \in P, h \in H. \quad (5.12)$$

El estado final de la explanada se obtiene con esta restricción ya que son igualados los arcos internos de cada pilar en el último segmento de tiempo con los datos de las localizaciones finales.

$$c_{e_{(t-1)p1}} + c_{d_{tp2}} = c_{i_{tp1}} \quad \forall c \in C, t \in T, T \neq 1, p \in P \quad (5.13)$$

Como para todos los flujos de redes deben existir restricciones de conservación de flujo. En ésta se garantiza que si existe flujo en el arco interno del pilar p en el segmento de tiempo t es porque existió flujo en el arco estático del mismo pilar en el segmento de tiempo $(t-1)$. Esto no quiere decir que el contenedor se haya movido de su ubicación ya que puede permanecer en un mismo pilar durante diferentes segmentos de tiempos.

$$c_{e_{(t-1)ph}} + c_{d_{tp(h+1)}} = c_{d_{tph}} + c_{i_{tph}} \quad \forall c \in C, t \in T, T \neq 1, p \in P, h \in H, h \neq \{1, MH\} \quad (5.14)$$

La segunda restricción de conservación de flujo es para los nodos intermedios, que representan los espacios del pilar que no son ni el último ni el primero. A un espacio intermedio h en el periodo de tiempo t solo puede provenir de dos nodos; el nodo de entrada que está en el espacio $h+1$ (sobre el), en el mismo periodo de tiempo t y pilar p o del nodo de salida del periodo anterior $t-1$ pero del mismo espacio h y pilar p . Lo anterior es expresado en el lado izquierdo de la ecuación. En el lado derecho se asegura que una vez originado este flujo, éste solo tenga dos opciones para continuar, las cuales son tomar el arco descendente o tomar el arco interno ambas opciones para igual segmento de tiempo t , pilar p y espacio h .

$$c_{e_{(t-1)pMH}} + \sum_{z \in P, z \neq p} c_{m_{(t-1)zp}} = c_{d_{tpMH}} + c_{i_{tpMH}} \quad \forall c \in C, t \in T, T \neq 1, p \in P. \quad (5.15)$$

Esta restricción es similar a la anterior. La diferencia es que tiene en cuenta solo las localizaciones en la cima de los pilares, por lo cual no considera que el flujo pueda venir de un nodo por encima de éste ya que no existe y considera entonces que el flujo puede venir de todos los posibles nodos superiores de los diferentes pilares que estén en el segmento de tiempo anterior a él.

$$\sum_{c \in C} c_{e_{(t-1)pMH}} + \sum_{c \in C} \sum_{\substack{z \in P, \\ z \neq p}} c_{m_{(t-1)zp}} \leq 1 \quad \forall t \in T, T \neq 1, p \in P. \quad (5.16)$$

Con esta restricción se garantiza que como máximo sea una la unidad de flujo que entre a cada pilar en el mismo segmento de tiempo.

$$c_{i_{tp1}} = c_{a_{tp1}} + c_{e_{tp1}} \quad \forall c \in C, t = 1, \dots, (T-1), p \in P. \quad (5.17)$$

De la restricción (5.17) a la (5.19) se conforma el conjunto de restricciones de flujo para los nodos de salida. En la primera se evalúan los nodos de salida que están en el fondo del pilar en donde para un flujo interno sólo puede tener dos opciones que son; tomar el arco ascendente o pasar al otro al nodo de entrada del otro periodo siguiente pero del mismo pilar por un arco estático.

$$c_{i_{tph}} + c_{a_{tp(h-1)}} = c_{a_{tph}} + c_{e_{tph}} \quad \forall c \in C, t = 1, \dots, (T-1), p \in P, h \in H, h \neq \{1, MH\} \quad (5.18)$$

Esta restricción corresponde sólo a los nodos intermedios en donde con la igualdad se garantiza la conservación del flujo horizontal o del vertical según el caso.

$$c_{i_{tpMH}} + c_{a_{tp(MH-1)}} = c_{e_{tpMH}} + \sum_{\substack{z \in P \\ z \neq p}} c_{m_{tpz}} \quad \forall c \in C, t = 1, \dots, (t-1), p \in P. \quad (5.19)$$

Esta restricción complementa este último conjunto de restricciones de conservación de flujo teniendo en cuenta los nodos de la cima de cada pilar, en donde al igual que en la anterior restricción se garantiza que tanto el flujo horizontal como el flujo vertical se conserven. En este caso es el que está en acenso y por lo cual seguirá en un arco de movimiento que lo cambiará de pilar.

$$\sum_{c1 \in C} c1 * c1_{uph} \geq \sum_{c2 \in C} c2 * c2_{up(h+1)} \quad \forall p \in P, h \in H, h \neq MH. \quad (5.20)$$

Se podría decir que esta es una de las restricciones más importantes en el modelo por su aporte al cumplimiento del objetivo final. Su principal propósito es reducir o eliminar las situaciones en donde un contenedor con fecha de salida cercana éste debajo de otro con fecha de salida próxima. Para identificar las fechas de salida los autores utilizan números que serán asignados a los contenedores. Por ejemplo un contenedor con numero 2 saldrá de la terminal después que un contenedor con numero 1. Para garantizar que un contenedor 2 no esté encima de un contenedor

1, y por ende no obstaculice su salida, se hace necesaria esta restricción ya que garantiza que si la variable $c1_{u_{ph}}$ toma valor de 1 para el pilar p y la ubicación h el numero del contenedor $c1$ localizado en esta ubicación tenga un numero más grande o igual que el contenedor $c2$ que está localizado en el mismo pilar pero en la localización $h+1$ (por encima de $c1$).

Modelo:

$$\text{Min} \sum_{\substack{t \in T \\ t \neq T}} \sum_{p \in P} \sum_{\substack{z \in P \\ z \neq p}} \sum_{c \in C} c_{m_{tpz}} \quad (5.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{c \in C} c_{i_{tp h}} \geq \sum_{c \in C} c_{i_{tp(h+1)}} \quad \forall t \in T, p \in P, h \in H, h \neq MH \quad (5.2)$$

$$c_{a_{tp h}} \leq c_{a_{tp(h+1)}} \quad \forall c \in C, t = 1, \dots, (T-1), p \in P, h = 1, \dots, (MH-2). \quad (5.3)$$

$$\sum_{c \in C} c_{i_{tp(h+1)}} + \sum_{c \in C} c_{a_{tp h}} \leq 1 \quad \forall t = 1, \dots, (T-1), p \in P, h \in H, h \neq MH \quad (5.4)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{z \in P, p \neq z} \sum_{c \in C} c_{m_{tpz}} \leq 1 \quad \forall t = 1, \dots, (T-1) \quad (5.5)$$

$$\sum_{c \in C} c_{a_{tp h}} \leq 1 \quad \forall t = 1, \dots, (T-1), p \in P, h \in H, h \neq MH \quad (5.6)$$

$$\sum_{c \in C} c_{i_{tp h}} \leq 1 \quad \forall t \in T, p \in P, h \in H \quad (5.7)$$

$$\sum_{c \in C} c_{d_{tp h}} \leq 1 \quad \forall t \in T, T \neq 1, p \in P, h \in H, h \neq 1. \quad (5.8)$$

$$\sum_{c \in C} c_{e_{tp h}} \leq 1 \quad \forall t = 1, \dots, (T-1), p \in P, h \in H \quad (5.9)$$

$$\sum_{c \in C} c_{m_{tpz}} \leq 1 \quad \forall t = 1, \dots, (T-1), p, z \in P, p \neq z \quad (5.10)$$

$$CI_{ph} = c_{i_{1ph}} \quad \forall c \in C, p \in P, h \in H. \quad (5.11)$$

$$CF_{ph} = c_{i_{Tph}} \quad \forall c \in C, p \in P, h \in H. \quad (5.12)$$

$$c_{e_{(t-1)p1}} + c_{d_{tp2}} = c_{i_{tp1}} \quad \forall c \in C, t \in T, T \neq 1, p \in P \quad (5.13)$$

$$c_{e_{(t-1)ph}} + c_{d_{tp(h+1)}} = c_{d_{tph}} + c_{i_{tph}} \quad \forall c \in C, t \in T, T \neq 1, p \in P, h \in H, h \neq \{1, MH\} \quad (5.14)$$

$$c_{e_{(t-1)pMH}} + \sum_{z \in P, z \neq p} c_{m_{(t-1)zp}} = c_{d_{tpMH}} + c_{i_{tpMH}} \quad \forall c \in C, t \in T, T \neq 1, p \in P. \quad (5.15)$$

$$\sum_{c \in C} c_{e_{(t-1)pMH}} + \sum_{c \in C} \sum_{\substack{z \in P, \\ z \neq p}} c_{m_{(t-1)zp}} \leq 1 \quad \forall t \in T, T \neq 1, p \in P. \quad (5.16)$$

$$c_{i_{tp1}} = c_{a_{tp1}} + c_{e_{tp1}} \quad \forall c \in C, t = 1, \dots, (T-1), p \in P. \quad (5.17)$$

$$c_{i_{tph}} + c_{a_{tp(h-1)}} = c_{a_{tph}} + c_{e_{tph}} \quad \forall c \in C, t = 1, \dots, (T-1), p \in P, h \in H, h \neq \{1, MH\} \quad (5.18)$$

$$c_{i_{tpMH}} + c_{a_{tp(MH-1)}} = c_{e_{tpMH}} + \sum_{\substack{z \in P \\ z \neq p}} c_{m_{tpz}} \quad \forall c \in C, t = 1, \dots, (t-1), p \in P. \quad (5.19)$$

$$\sum_{c1 \in C} c1 * c1_{uph} \geq \sum_{c2 \in C} c2 * c2_{up(h+1)} \quad \forall p \in P, h \in H, h \neq MH. \quad (5.20)$$

$$c_{a_{tph}} \in \{0,1\} \quad \forall c \in C, t = 1, \dots, (T-1), p \in P, h \in H, h \neq MH \quad (5.21)$$

$$c_{d_{tph}} \in \{0,1\} \quad \forall c \in C, t \in T, t \neq 1, p \in P, h \in H, h \neq 1. \quad (5.22)$$

$$c_{i_{tph}} \in \{0,1\} \quad \forall c \in C, t \in T, p \in P, h \in H. \quad (5.23)$$

$$c_{e_{tph}} \in \{0,1\} \quad \forall c \in C, t = 1, \dots, (T-1), p \in P, h \in H. \quad (5.24)$$

$$c_{m_{tpz}} \in \{0,1\} \quad \forall c \in C, t = 1, \dots, (T-1), p \in P, z \in P, p \neq z. \quad (5.25)$$

La función objetivo del modelo es minimizar el sumatorio de todos los movimientos necesarios en la operativa de relocalización o reagrupación de los contenedores. En la situación final los contenedores de menor valor deben estar por encima de los de mayor o igual valor a este. En la figura 18 se puede observar la relocalización de contenedores con $T=3$, $P=3$ y $H=3$, donde los contenedores pasan de la situación inicial en $t=1$ a la situación final en $t=3$

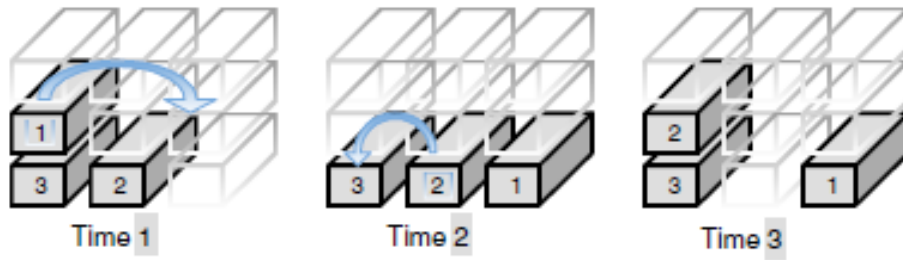


Figura 18. Relocalización de contenedores

Fuente: Lee y Hsu (2007a)

Como se puede observar a lo largo del modelo los autores pretenden localizar los contenedores en espacios que ayuden a minimizar el tiempo de carga de estos a los buques ya que como sustentan una de las formas de medir el rendimiento de los puertos es por la cantidad de tiempo que pasan los buques atracados en la terminal realizando las operaciones de carga y descarga. En la tabla 7 se realiza una clasificación de las referencias más relevantes en la relocalización de contenedores, entre las que fueron consultadas para elaborar este apartado.

Tabla 7 Clasificación de los trabajos enfocados a la relocalización de contenedores en las TCP

Trabajo	Modelo	Metodología de resolución	objetivo
Kim y Hong (2006)	Proceso algorítmico	Heurística	Minimizar relocalizaciones
Lee y Chao (2009)	IP	Heurística	Minimizar relocalizaciones
Lee y Hsu (2007)	IP	Heurística	Minimizar relocalizaciones
Aydin (2007)	Proceso algorítmico	Heurística	Minimizar relocalizaciones y desplazamientos
Kang et al (2006)	Proceso algorítmico	Heurística	Minimizar tiempos
Kim y Bae (1998)	Proceso algorítmico	Heurística	Minimizar tiempo de estiba
Kim (1997)	Proceso algorítmico	Heurística	Evaluar estrategias

3.4. Operativa de transferencia “Transport optimization”

Una terminal de contenedores tiene dos principales tipos de transporte: el transporte horizontal que moviliza los contenedores a través de toda la terminal y el transporte para apilado de contenedores. El transporte horizontal se subdivide en transporte en muelles y transporte de tierra sirviendo a barcos, camiones y trenes respectivamente. Así camiones, carretillas *stradle carriers*, grúas, etc. están desplazándose por el terminal constantemente.

3.4.1. Optimización del transporte en muelles “The quayside transport”

Para realizar las operaciones de carga y descarga de los contenedores en los buques, es necesario transportar los contenedores desde los diferentes bloques en la ZA hasta las grúas que estén asignadas a cada buque (Quayside Transport Planning - QTP). Esta zona de la terminal es conocida como *buffer* y es necesario optimizar el transporte en esta por motivos tales como:

- La sincronización de los vehículos de transporte horizontal con las grúas pórtico evita la generación de tiempos ociosos y cuellos de botella.
- El diseño de rutas puede eliminar posibles atascos en la zona de muelles.
- Los vehículos de transporte horizontal son utilizados constantemente en toda la TCP por lo cual su óptima asignación permite un buen funcionamiento global.
- La eficiencia de la operación de carga y descarga de contenedores que realizan las grúas pórtico depende directamente de la eficiencia del transporte en muelles.

En los últimos tiempos el transporte entre la zona de muelles y la ZA, está siendo realizado por vehículos auto-guiados más conocidos como AGVs por sus siglas en ingles “*Automated Guided Vehicles*”. Estos vehículos son más eficientes que los camiones con plataforma o los equipos de manipulación frontal en la movilización de contenedores. En la literatura encontramos trabajo como Ying-Chin y Ping-Fong (2004), Ho y Chien (2006), Grunow et al (2004) Duinkerken et al (2006a) y Lehmann (2006) que evalúan los beneficios de la automatización de TCP con este tipo de vehículos, pero de igual forma identifican que estos dependen de otras maquinarias para realizar su trabajo.

Para obtener el máximo rendimiento de este tipo de vehículos se deben realizar altas inversiones de instalaciones, software y equipos necesarios que permitan incorporarlos al funcionamiento de la terminal. Todo este es beneficioso para TCP, siempre y cuando tenga un buen flujo de contenedores. Kim y Günther (2005) realizan una recopilación de trabajos donde se estudian las diferentes situaciones de optimización de estos tipos de vehículos de manera que logre alcanzar su máximo rendimiento.

Existe otro tipo de vehículo auto-guiado conocido como ALV (*automated lifting vehicle*) los cuales pueden levantar los contenedores del suelo sin necesidad de ser ayudados por otro equipo de manipulación. En trabajos como Nguyen y Kim (2009), Iris y Harika (2004), Yang et al (2004), Duinkerken et al (2006b) realizan comparaciones entre los AGVs y los ALVs en terminales de contenedores automatizadas, en la mayoría de los estudios los ALVs muestran mayor rendimiento al realizar las tareas de transporte en muelles.

Kim et al (2004c) definen dos tipos de tareas que son realizadas por los AGVs; las operaciones de transporte de contenedores descargados con sentido muelle a ZA y operaciones de transporte de contenedores para carga con sentido ZA a muelle. Estas dos movilizaciones de contenedores son asignadas a los AGVs como tareas de entrega, las cuales están coordinadas de acuerdo a la programación del buque. El objetivo es minimizar los tiempos de demora que se pueden generar en las operaciones de descarga y carga de contenedores a buque. Los autores tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones en el desarrollo y procedimiento de solución:

- Las tareas deben ser realizadas exactamente en el mismo orden que la secuencia de la lista de carga y descarga de buque, la cual es realizada antes de comenzar la operación y ya ha sido previamente confirmada por la compañía naviera.
- La principal prioridad es minimizar los tiempos de espera de las grúas pórtico y las RTG, por encima de la minimización de los tiempos de viaje de los AGVs, ya que por lo general las TCP cuentan con menos grúas pórtico y RTG con AGVs. Lo anterior pretende evitar cuellos de botella.
- Una demora en la operación de transferencia por una grúa de muelle da como resultado una demora de igual cantidad de tiempo para todas las operaciones de transferencia de esa misma grúa.

En la figura 19 se puede ver un ejemplo de una TCP en la cual el transporte en muelles es realizado por AGVs, como se sustento en las consideraciones anteriores la maquinaria de manipulación involucrada son las grúas de muelle, las grúas de explanada y los AGVs, los círculos y los cuadrados negros representan los puntos en los que los AGVs entregaran o recibirán cada contenedor por la respectiva grúa.

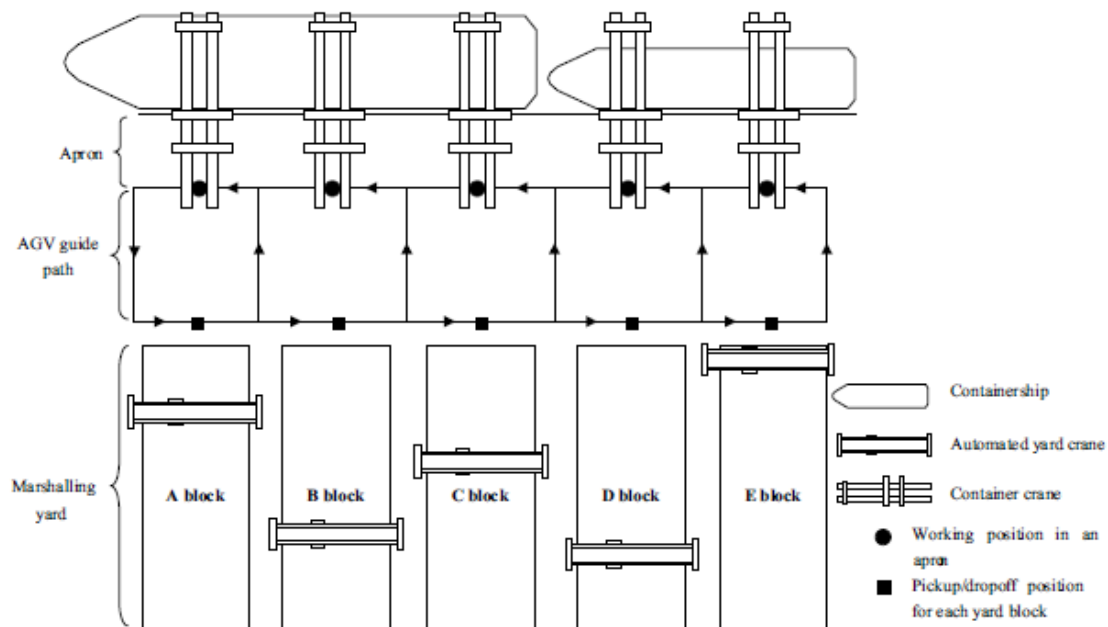


Figura 19. Terminal de contenedores automatizada

Fuente: Kim et al (2004c)

Para la elaboración del modelo matemático los autores realizan otras consideraciones mas específicas relacionadas a continuación.

- Cada AGV puede ser asignado o servir a más de una grúa de muelle.
- Todos los AGVs son iguales y sólo pueden transferir un contenedor a la vez.
- Los tiempos de espera de los AGVs debajo de las grúas de explanada no son considerados.
- Los tiempos que demora una grúa de muelle en soltar un contenedor sobre un AGV o tomarlo de éste son insignificantes.
- Las congestiones que se puedan generar entre los diferentes recorridos que realizan los AGVs en las operaciones de transferencia no son consideradas.
- Los AGVs experimentan tres tipos de eventos durante una operación de transferencia:

- (1) Evento inicial que es cuando un AGV inicia la primera tarea de entrega.
- (2) Evento secundario cuando un AGV comienza a recibir un contenedor de una grúa de muelle o cuando comienza a transferir un contenedor a una grúa de muelle
- (3) Evento de parada que es cuando un AGV completa todas sus tareas asignadas.

Para comprender la consideración de los eventos se muestra en la figura 20 una tabla que representa la operación de buque realizada por una grúa de muelle y los respectivos eventos que esto causa.

Task sequence	Time scale	Event	Description
1	0	① e_1^1	① CC 1 starts picking up the 1st container.
		②	② CC 1 ends picking up the 1st container.*
	50	③	③ CC 1 starts releasing the 1st container into a slot of a vessel.
	100	④	④ CC 1 ends releasing the 1st container and starts moving toward the 2nd container.
2	150	⑤	⑤ CC 1 starts releasing the 2nd container onto an empty AGV (At this moment, an empty AGV must be ready under CC 1).
	200	⑥ e_2^1	⑥ CC 1 ends releasing the 2nd container and starts picking up the 3rd container from an AGV (Assume that the AGV is already ready under CC 1).
	250	⑦ e_3^1	⑦ CC 1 ends picking up the 3rd container.
3	300	⑧	⑧ CC 1 starts releasing the 3rd container.
	350	⑨	⑨ CC 1 ends releasing the 3rd container and starts moving toward the 4th container.
4	450	⑩ e_4^1	⑩ CC 1 starts releasing the 4th container onto an empty AGV (At this moment, an empty AGV must be ready under CC 1).
	500	⑪	⑪ CC 1 ends releasing the 4th container.

Figura 20. Operativa de carga y descarga de buque

Fuente: Kim et al (2004c)

Modelo para el QTP

Parámetros:

- V Conjunto de vehículos AGVs
- K Conjunto de grúas de mulles
- T Conjunto de eventos e_{ik} para $i = 1, 2, \dots, m_k$ y para $k \in K$
- S Conjunto de $e_{0j}, j \in V, S \cup T$
- D Conjunto de $e_{Fj}, j \in V, D \cup T$
- K' Se establece como $= \{0\} \cup K$
- K'' Se establece como $= \{F\} \cup K$

Datos:

- e_{ik} Evento que corresponde al comienzo de la acción de tomar o dejar un contenedor de o en un AGV, para realizar la tarea relacionada al contenedor i de la grúa de muelle k (la i -ésima operación de la grúa k)
- e_{0j} Evento inicial del AGV $j, j \in V$
- e_{Fj} Evento de parada de un AGV, $j \in V$
- m_k Tareas a realiza por la grúa k
- $l(e_{ik})$ Localización en la terminal donde el evento e_{ik} ocurre, representa la posición donde el i -ésimo contenedor de la grúa k será transferido.
- $l(e_{i0})$ Representa la localización inicial del AGV j
- $l(e_{iF})$ Localización en donde un AGV completa su última tarea de entrega
- t_{ikjl} Tiempo de viaje de $l(e_{ik})$ a $l(e_{lj})$
- c_{ikjl} Tiempo que requiere un AGV para estar listo para el evento
- α Coste de viaje por unidad de tiempo de un AGV
- β Coste de penalización por unidad de tiempo de las demoras en que se incurran durante el tiempo total

Variables:

- y_{ik} Variable continua que representa el instante de tiempo en el que ocurre el evento e_{ik}
- s_{ik} Variable continua que representa el instante de tiempo anterior del posible evento e_{ik} (si no hay demoras el instante de tiempo en que ocurre el evento e_{ik} , y_{ik} es denotado como s_{ik})
- x_{ikjl} Variable binaria que toma el valor de 1 si e_{ik} se asigna a e_{lj} para $k \in K'$ y $k \in K''$. Esto implica que el AGV después de entregar el contenedor

i a la grúa k , es programado para entregar el contenedor j a la grúa l

Restricciones:

$$\sum_{l \in K''} \sum_{j=1}^{m_l} x_{ikjl} = 1 \quad \forall k \in K', i = 1, \dots, m_k. \quad (6.2)$$

$$\sum_{l \in K'} \sum_{j=1}^{m_k} x_{ikjl} = 1 \quad \forall l \in K'', j = 1, \dots, m_l. \quad (6.3)$$

Mediante estas dos restricciones se garantiza que cada una de las operaciones de la grúa k , tanto iniciales como finales sean programadas una a una, de manera que estas sean realizadas en pares y de forma continua. Con el signo igual se garantiza que sólo exista un AGV programado para ese par de tareas.

$$y_{jl} - (y_{ik} + c_{ikjl}) \geq M(x_{ikjl} - 1) \quad \forall k \in K', l \in K, i = 1, \dots, m_l. \quad (6.4)$$

Con esta restricción se asegura que el instante de tiempo en que un AGV va a realizar la segunda tarea de las dos que tiene programadas no coincida con el tiempo en que realizó la primera más el tiempo que necesitó para estar listo para la segunda. De esta forma no se realizan programaciones de tareas consecutivas en las cuales un AGV no pueda cumplir con esta condición.

$$y_{(i+1)k} - y_{ik} \geq s_{(i+1)k} - s_{ik} \quad \forall k \in K, i = 1, \dots, m_k - 1. \quad (6.5)$$

Esta restricción garantiza que dos eventos que son servidos por la misma grúa pórtico deben estar separados por al menos el tiempo requerido para que la grúa pueda realizar los movimientos necesarios en los dos eventos.

$$y_{ik} \geq s_{ik} \quad \forall k \in K', i = 1, \dots, m_k. \quad (6.6)$$

Con esta restricción se garantiza que el tiempo de inicio del evento actual sea siempre mayor o igual (que esté después) que el instante de tiempo que lo precedido.

Modelo:

$$\text{Min} \quad \alpha \sum_{k \in K'} \sum_{i=1}^{m_k} \sum_{l \in K''} \sum_{j=1}^{m_l} t_{kijl} x_{ikjl} + \beta \sum_{k \in K} (y_{km_k} - s_{km_k}) \quad (6.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{l \in K''} \sum_{j=1}^{m_l} x_{ikjl} = 1 \quad \forall k \in K', i = 1, \dots, m_k. \quad (6.2)$$

$$\sum_{l \in K'} \sum_{j=1}^{m_k} x_{ikjl} = 1 \quad \forall l \in K'', j = 1, \dots, m_l. \quad (6.3)$$

$$y_{jl} - (y_{ik} + c_{ikjl}) \geq M(x_{ikjl} - 1) \quad \forall k \in K', l \in K, i = 1, \dots, m_l. \quad (6.4)$$

$$y_{(i+1)k} - y_{ik} \geq s_{(i+1)k} - s_{ik} \quad \forall k \in K, i = 1, \dots, m_k - 1. \quad (6.5)$$

$$y_{ik} \geq s_{ik} \quad \forall k \in K', i = 1, \dots, m_k. \quad (6.6)$$

$$x_{ikjl} = \{0,1\} \quad \forall k \in K', l \in K'', i = 1, \dots, m_l. \quad (6.7)$$

El objetivo del modelo es minimizar principalmente los costes de viaje por unidad de tiempo de los AGV (α) pero sin dejar a un lado los costes por demoras en la carga y descarga de los contenedores (β). Los autores no tienen en cuenta las posibles interferencias entre los AGV, tema considerablemente estudiado ya que es uno de los principales problemas al utilizar este tipo de vehículos. Debido a que una mala programación de los vehículos automatizados puede generar fácilmente gestiones por su poco nivel de reacción a eventos no previstos.

En la tabla 8 se realiza una clasificación de las referencias más relevantes entre las que fueron consultadas para elaborar este apartado.

Tabla 8 Clasificación de los trabajos enfocados a la optimización del transporte en los muelles

Trabajo	Modelo	Metodología de resolución	objetivo
Vis et al (2005)	Proceso algorítmico	Modelos analíticos	Minimizar utilización del recurso
Nguyen y Kim (2009)	MIP	Heurística	Minimizar tiempos
Kim y Bae (2004)	MIP	Heurística	Minimizar tiempos
Ho y Hsieh (2004)	LP	Simulación	Minimizar distancias
Ho y Chien (2006)	Modelo de simulación	Simulación	Evaluar estrategias
Duinkerken et al (2006)	Modelo de simulación	Simulación	Evaluar estrategias
Vis y Harika (2004)	Modelo de simulación	Simulación	Evaluar equipos
Grunow et al (2004)	MIP	Heurística	Minimizar costos
Bish et al (2005)	Proceso algorítmico	Heurística	Minimizar tiempos
Briskorn et al (2006)	Modelo de simulación	Simulación	Evaluar estrategias
Qiu et al (2002)	Review	Review	
Yang et al (2004)	Modelo de simulación	Simulación	Evaluar equipos
Grunow et al (2006)	Modelo de simulación	Simulación	Evaluar estrategias
Vis (2006)	Review	Review	
Duinkerken et al (2006)	Modelo de simulación	Simulación	Evaluar equipos
Lehmann et al (2006)	Proceso algorítmico	Heurística	Minimizar tiempos muertos
Kim et al (2006)	Proceso algorítmico	Heurística	Minimizar tiempos muertos

3.4.2. Optimización del transporte terrestre “The landside transport”

En esta operativa se planifican todos los movimientos de contenedores que se realizan en una TCP. Estos suelen pasar en la terminal en promedio siete días, desde el día de su llegada hasta justo antes de su partida. Los movimientos de contenedores se realizan para permitir el desarrollo de actividades como: inspecciones en aduanas, desembalaje de la carga, reubicación de contenedores vacíos, etc.

La gestión del transporte terrestre es enfocada desde diferentes puntos de vista en la literatura. Trabajos como Chao (2002) y Scheuerer (2006) proponen una variación del “*Vehicle Routing Problem*” (VRP) a rutas de camiones, lo que genera el “*Trailer Routing Problem*” (TRP). El objetivo es minimizar las distancias dentro de la terminal. Esta propuesta ha servido de base para el desarrollo de trabajos como los de Julia et al (2005), Mattfeld y Orth (2006), Namboothiri y Erera (2008), y Caris y Janssens (2008) que modelan el acarreo de los contenedores dentro de la terminal con el objetivo de minimizar costes y distancias.

Otros trabajos se enfocan en la gestión de sólo ciertas maquinarias de transporte terrestre como en Corry y Kozan (2006) y Hansen (2004) que gestionan el transporte terrestre realizado por camiones con más de una plataforma (tren-camión), y Das y Spasovic (2003) que proponen un procedimiento para la asignación de *straddle carriers* a camiones para realizar la operación de carga y descarga de contenedores.

La operación de carga y descarga en la zona de llegadas terrestres es otra actividad que genera gran cantidad de movimientos de contenedores en la TCP. Por lo general las TCP cuentan con instalaciones que permiten la llegada tanto de camiones como de trenes, pero el flujo de cada modo de transporte puede variar según la importancia que represente cada uno en la TCP. Por lo cual el número de vehículos que se asignen a cada modo de transporte va a depender de la importancia que ésta tenga para cada terminal de contenedores.

Como se explicó anteriormente en algunos trabajos para gestionar el transporte terrestre lo enfocan como un problema de rutas de vehículos del tipo VRP dentro de la TCP. Entre estos encontramos a Nishimura et al (2005) en el abordan los movimientos internos como un problema de rutas de camiones en la explanada de una TCP. Ellos se basan en que la optimización de estas rutas reduce la distancia de los trayectos realizados por los camiones de un punto a otro en la terminal. Realizan una variación del VRP que es el VRPB siglas de la definición en inglés “*The vehicle routing problem backhauls*”, este es el problema de rutas de vehículos con recorridos de regreso. Al resolver el VRPB se encuentra un conjunto óptimo de secuencias de entrega y recogida de contenedores, en el cual los vehículos parten de un punto en especial.

Los autores proponen un modelo para optimizar las rutas de los camiones que realizan movimientos de contenedores entre la ZA y los muelles. Este modelo permite optimizar las rutas de ida y regreso entre diferentes punto ubicados en

cualquier parte de la terminal. En la figura 22 se muestra la ubicación de 3 puntos de entrega y 9 de recogida en la terminal. Al solucionar el problema se obtiene una secuencia de rutas que conectarán los puntos de recogida y entrega.

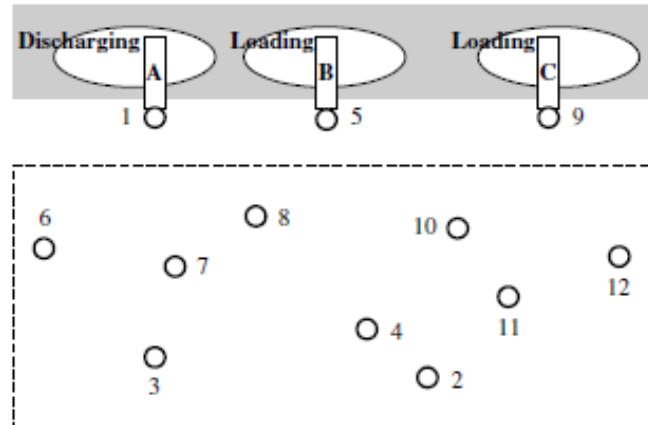


Figura 21. Localización de los contenedores a movilizar dentro de la terminal
Fuente: Nishimura et al (2005)

Los autores tienen en cuenta dos consideraciones para modelar la situación

- Todos los contenedores son de igual tamaño (40')
- Los camiones utilizados para realizar los movimientos pueden transportar como máximo un contenedor a la vez.

Se define a continuación la notación utilizada.

Parámetros:

P Conjunto de puntos que serán visitados por los camiones

H Conjunto de camiones que realizarán los movimientos.

M Conjunto de grúas de muelle.

Md Subconjunto de grúas de muelle que están realizando la descarga de contenedores del buque y los están colocando sobre los camiones.

Datos:

D_{ij} Distancia del punto i al punto j .

C_i Conjunto de contenedores apilados en los puntos relacionados con la grúa i .

V_i Volumen de contenedores manipulados en el punto i siendo $V_i > 0$ si los camiones van a recoger contenedores en i , $V_i < 0$ si los camiones van a

entregar.

Q_k Capacidad del camión k

Variables:

x_{ijk} Variable binaria que toma valor de 1 si el camión k va del punto i al punto j y 0 de otra forma.

y_{ik} Variable binaria que toma el valor de 1 si el punto i es servido por el camión k y 0 de otra forma.

w_{jk} Variable continua que representa la cantidad de contenedores que esta transportando el camión k justo antes de visitar el punto j .

Restricciones:

$$\sum_{i \in P} \sum_{k \in H} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in P \quad (7.2)$$

$$\sum_{j \in P} \sum_{k \in H} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in P \quad (7.3)$$

Se explican la restricción (7.2) y (7.3) juntas ya que se complementan entre sí en la tarea de garantizar que cada punto j e i respectivamente sea visitado solo una vez por un camión k , el signo igual es de gran importancia ya que de acuerdo al objetivo del modelo de minimizar los recorridos, visitar un punto más de una vez generaría desplazamientos innecesarios.

$$w_{jk} = 0, \quad \forall j \in Md, \quad k \in H \quad (7.4)$$

$$w_{jk} = \sum_{i \in P} (w_{ik} + V_i) x_{ijk} \leq Q_k \quad \forall j \in P, \quad P \neq Md, \quad k \in H \quad (7.5)$$

Con estas dos restricciones se garantiza que cuando un camión va a un punto de entrega de contenedores (Md), no este transportando ningún contenedor, además de que la cantidad de contenedores que transporta no pueden tener como destino puntos de entrega, ni pueden superar la capacidad del mismo camión.

$$y_{ik} = \sum_{j \in P} x_{ijk} \quad \forall i \in P, k \in H \quad (7.6)$$

En esta restricción al igualar las dos variables binarias se garantiza que si se programa que el camión k va del punto i al punto j es porque el punto i fue servido por el camión k .

$$\sum_{k \in H} ky_{ik} = \sum_{k \in H} ky_{jk} \quad \forall i \in M, j \in C_i \quad (7.7)$$

Mediante esta restricción se asegura que la cantidad de veces que los camiones k sirven un punto i en la zona de grúas sea igual a la cantidad de veces que los mismos camiones k sirven los puntos j localizados en la ZA. Para cada grúa del punto i .

Modelo:

$$\text{Min} \sum_{i \in P} \sum_{j \in P} D_{ij} x_{ijk} \quad (7.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in P} \sum_{k \in H} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in P \quad (7.2)$$

$$\sum_{j \in P} \sum_{k \in H} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in P \quad (7.3)$$

$$w_{jk} = 0, \quad \forall j \in Md, \quad k \in H \quad (7.4)$$

$$w_{jk} = \sum_{i \in P} (w_{ik} + V_i) x_{ijk} \leq Q_k \quad \forall j \in P, \quad P \neq Md, \quad k \in H \quad (7.5)$$

$$y_{ik} = \sum_{j \in P} x_{ijk} \quad \forall i \in P, k \in H \quad (7.6)$$

$$\sum_{k \in H} ky_{ik} = \sum_{k \in H} ky_{jk} \quad \forall i \in M, j \in C_i \quad (7.7)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in P, k \in H \quad (7.8)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in P, k \in H \quad (7.9)$$

La función objetivo del modelo es la minimiza el total de distancias de todos los recorridos necesarios para movilizar todos los contenedores entre los diferentes puntos localizados en la terminal. Los autores tienen en cuenta vehículos que para poder realizar movimientos necesitan de la ayuda de grúas pórtico ya que estas son las que cargan o descargan los contenedores sobre o de ellos. El modelo puede ser adaptado para tener en cuenta vehículos que no necesiten ayuda para movilizar contenedores tales como los *straddle carriers* o los AGVLs.

En la tabla 9 se realiza una clasificación de las referencias más relevantes entre las que fueron consultadas para elaborar este apartado.

Tabla 9 Clasificación de los trabajos enfocados en la optimización del transporte terrestre

Trabajo	Modelo	Metodología de resolución	objetivo
Jula et al (2005)	Proceso algorítmico	Heurística	Minimizar distancias
Mattfeld y Orth (2006)	MIP	Heurística	Minimizar utilización del recurso
Jinxin et al (2008)	IP	Heurística + Algoritmo Genético	Minimizar tiempo de espera
Scheuerer (2006)	Proceso algorítmico	Heurística	Minimizar distancias
Chao (2002)	Proceso algorítmico	Heurística	Minimizar distancias
Corry y Kozan (2006)	MIP	Modelos analíticos	minimizar tiempo y manipulaciones
Hansen (2004)	Review	Review	
Namboothiri y Erera (2008)	IP	Heurística	Minimizar costos
Das y Spasovic (2003)	Proceso algorítmico	Simulación + heurística	minimizar tiempo y manipulaciones
Nishimura et al (2005)	IP	Heurística	Minimizar distancias
Caris y Janssens (2008)	MIP	Heurística	Minimizar costos

3.4.3.Optimización/programación de las grúas “The yard crane scheduling problem”

Es de gran importancia aplicar métodos de optimización para planificar el trabajo de las grúas de explanada. Entre los equipos más utilizados para cargar y descargar contenedores en la zona de almacenamiento son las grúas RTG y RMG explicadas anteriormente. Como se ha visto a lo largo de este capítulo en las TCP se hace uso de las grúas de explanada constantemente, soportando tareas como:

- Relocalización de contenedores en la explanada
- Recepción de contenedores que entran a la terminal para exportación
- Recepción y entrega de contenedores a maquinaria de manipulación terrestre

El principal objetivo de la programación de las grúas de explanada (Yard Crane Scheduling Problem - YCSP) es reducir los tiempos de espera en las diferentes maquinarias de la terminal que éstas puedan ocasionar, como por ejemplo los vehículos que realizan los movimientos entre la zona de muelles y la explanada. Como objetivos complementarios tiene en cuenta:

- Minimizar el tiempo de operaciones de buque
- Incrementar el flujo total de contenedores manipulados en la terminal.

Varias grúas RTG pueden operar en un mismo bloque de contenedores por lo cual en Jung y Kim (2006b) tienen en cuenta la interferencia entre las grúas como una restricción al desplazarse sobre el mismo bloque y línea. En muchos trabajos los autores coinciden que las grúas RTG son el cuello de botella de las TCP tales como; Lee et al (2007b) y Ng. y Mac. (2005a) se dan cuenta que una de las principales causas de los cuellos de botella en la zona de explanada es la lentitud con que operan las RTG, por lo cual proponen un modelo para programar la secuencias de tareas que deben de realizar estos equipos de manera que se minimice el tiempo de operación. Nuevas propuestas de maquinaria se tiene en cuenta en trabajos como Zyngiridis (2005) y Soriguera et al (2006) en el cual considera los *straddle carriers* para la realización de todos los movimientos en la ZA.

Ng. (2005b) estudian el problema de programación de múltiples grúas RTG considerando interferencia en la zona de explanada. El modelo que proponen tiene como objetivo minimizar los tiempos de espera de los vehículos de transferencia. Consideran el diseño de la explanada en bloques de contenedores. Estos por los regular tienen una extensión de aproximadamente 8 filas de contenedores de ancho, 5 a 7 contenedores de alto (depende del tipo de grúa RTG de la TCP) y un largo de 30 a 60 contenedores (el largo es una de las dimensiones que mas varía según el tipo de terminal). En la figura 20 se muestra la distribución en planta de la ZA de una terminal de contenedores que almacena en bloques.

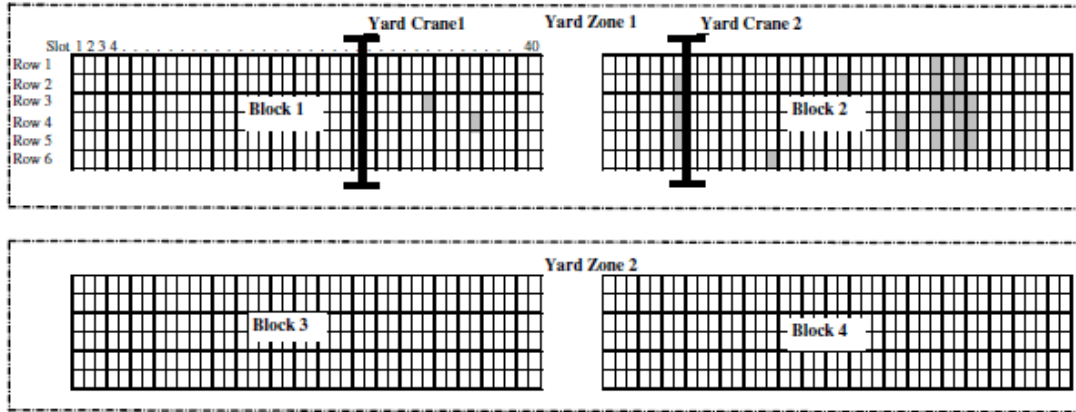


Figura 22. Diseño parcial de la zona de almacenamiento.

Fuente: Ng. (2005b)

Como las RTG y RMG son grandes y lentas para lograr el objetivo de minimizar el tiempo de espera del transporte terrestre de manipulación es común encontrar más de una en un mismo bloque o zona de la explanada. Las grúas realizan viajes en sentido bidireccional sobre los bloques para servir a los vehículos, por lo cual se hace necesario considerar en el modelo las posibles interferencias que se puedan causar entre estas. Los autores realizan un modelo de programación entera y en el cual utilizan las siguientes consideraciones y notación.

Consideraciones:

- Cada grúa pórtico RTG ocupa un espacio de la zona de almacenamiento.
- Se realiza una clasificación y numeración de los trabajos tal que $r_i \leq r_{i+1}$.
- El tiempo máximo de operación de la óptima programación de grúas es conocido y este se divide en π periodos de igual tamaño, tal que, cada uno sea igual al tiempo requerido por una RTG para desplazarse un espacio.
- Si una RTG comienza un trabajo de manipulación no realizara ningún otro hasta terminar este.
- Las RTG son numeradas de forma que $\alpha_k \leq \alpha_{k+1}$.

Parámetros:

- n** Número total de tareas
- π** Número total de periodos
- m** Número total de grúas
- θ** Conjunto de espacios en los bloques numerados de 1 a θ
- $p(l)$** Conjunto de espacios para una RTG localizada en el espacio $l, l = 1, 2, \dots, \theta$,

- en el periodo $t, t = 1, 2, \dots, \pi$, en la que posiblemente podrá estar en el periodo $t-1$
- $s(l)$ Conjunto de espacios para una RTG localizada en el espacio $l, l = 1, 2, \dots, \theta$, en el periodo $t, t = 0, 1, 2, \dots, \pi - 1$, en la que posiblemente podrá estar en el periodo $t+1$
- G Cota superior positiva lo suficientemente grande

Datos:

- h Tiempo requerido por una RTG para realizar un trabajo de manipulación.
- r_i Tiempo necesario para que una RTG esté lista para el trabajo i
- t Periodos de tiempo tal que $t = 1, \dots, \pi$
- i Tareas a realizar en la operación tal que $i = 1, \dots, n$.
- β_i Localización del trabajo i , el cual es expresado por el numero del espacio
- l Localización de cada espacio tal que $l = 1, \dots, \theta$.
- k Grúas RTG tal que $k = 1, \dots, m$.
- α_k Localización inicial (en $t = 0$) de cada grúa k tal que $\alpha_k \in \{1, 2, \dots, \theta\}$

Variables:

- x_{ijk} Variable binaria que toma valor de 1 si la grúa k realiza el trabajo i antes del trabajo j y 0 de otra forma.
- y_{klt} Variable binaria que toma valor de 1 si la grúa k esta en el espacio l en el periodo t y 0 de otra forma.
- w_{ikt} Variable binaria que toma valor de 1 si la grúa k termina el trabajo de manipulación i en el periodo t y 0 de otra forma.

En el despacho de un vehículo para la realización del trabajo i , su tiempo de espera en la explanada está dado por $\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^{\pi} tw_{ikt} - h - r_i$ y debido a que h y r_i son constantes dadas, los autores minimizan la ecuación la cual queda como $\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^{\pi} tw_{ikt}$ que es el tiempo total en que se completan todas las tareas.

Restricciones:

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^{\pi} tw_{ikt} \geq r_i + h \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8.2)$$

Esta restricción controla que el tiempo total en que se completa cada tarea i sea mayor o igual que el tiempo que la grúa tarda en realizar el trabajo de manipulación más el tiempo que demora en estar lista para realizar la misma tarea

i , en otras palabra que el tiempo total de trabajo sea igual a la suma de los dos procesos que realiza la grúa por cada tarea que realiza.

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^{\pi} w_{ikt} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8.3)$$

Como todo modelo de asignación se debe tener una restricción como ésta donde se garantice que para cada tarea exista una grúa asignada en un periodo de tiempo, de manera que no quede ninguna tarea sin realizar y que tampoco se realice más de una vez.

$$\sum_{j=0}^h y_{k\beta_i(t-1)} - h - 1 \geq G(w_{ikt} - 1) \quad k = 1, \dots, m, i = 1, \dots, n, t = h, h + 1, \dots, \pi \quad (8.4)$$

Mediante esta restricción se asegura que, para una grúa k que esté realizando un trabajo i , permanezca en la localización de ese trabajo durante todo el tiempo de la operación.

$$y_{klt} \leq \sum_{j \in p(l)} y_{kj(t-1)} \quad k = 1, \dots, m, l = 1, \dots, \theta, t = 1, \dots, \pi \quad (8.5)$$

De acuerdo al subconjunto $p(l)$ definido en los parámetros del modelo, en esta restricción se establece que si la variable binaria que indica que la grúa k esta en el periodo t en la localización l es porque estuvo en la localización j en el periodo anterior $t-1$.

$$y_{klt} \leq \sum_{j \in s(l)} y_{kj(t+1)} \quad k = 1, \dots, m, l = 1, \dots, \theta, t = 0, 1, \dots, \pi - 1 \quad (8.6)$$

Esta restricción complementa la anterior ya que ésta tiene en cuenta el otro subconjunto $s(l)$, en el que de igual forma si la grúa k está en la localización l en el periodo t , estará en la localización j en el periodo $t+1$.

$$G(1 - y_{klt}) \geq \sum_{q=l}^{\theta} y_{(k-1)qt} \quad k = 2, 3, \dots, m, l = 1, 2, \dots, \theta, t = 1, 2, \dots, \pi \quad (8.7)$$

Esta restricción corresponde a la parte de la interferencia que plantean los autores ya que teniendo en cuenta la numeración de las grúas k con esta desigualdad se controla que si una grúa k está en una localización l en el periodo t la grúa $k-1$ no

pueda estar en esa misma localización evitando de esta manera la interferencia entre las grúas.

$$\sum_{l=1}^{\theta} y_{klt} = 1 \quad k = 1, \dots, m, \quad t = 1, \dots, \pi \quad (8.8)$$

En esta restricción se tiene en cuenta todas las localizaciones de la explanada de manera que se garantice que una grúa solo puede estar en una de ellas por cada periodo de tiempo.

$$\sum_{t=h}^{\pi} t(w_{jkt} - w_{ikt}) \geq h - G(1 - x_{ijk}) \quad i, j = 1, \dots, n, i \neq j, k = 1, \dots, m \quad (8.9)$$

Mediante esta restricción se controla la secuencia de los trabajos en el horizonte de tiempo ya que sí y solo si una grúa podrá realizar un trabajo i antes de un trabajo j si el periodo de tiempo de completar el trabajo i está antes que el del trabajo j , de lo contrario no es posible.

$$\sum_{t=h}^{\pi} (w_{jkt} + w_{ikt}) - 1 \leq x_{ijk} + x_{jik} \quad i, j = 1, \dots, n, i \neq j, k = 1, \dots, m \quad (8.10)$$

Esta restricción relaciona el tiempo de completar cada una tarea con el tiempo de las tareas siguientes. El resto de las restricciones son de integridad donde se obliga a que las tres variables binarias solo puedan tomar valor de 0 o 1.

Modelo:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^{\pi} tw_{ikt} \quad (8.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^{\pi} tw_{ikt} \geq r_i + h \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8.2)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^{\pi} w_{ikt} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8.3)$$

$$\sum_{j=0}^h y_{k\beta_i(t-1)} - h - 1 \geq G(w_{ikt} - 1) \quad k = 1, \dots, m, i = 1, \dots, n, t = h, h + 1, \dots, \pi \quad (8.4)$$

$$y_{klt} \leq \sum_{j \in p(l)} y_{kj(t-1)} \quad k = 1, \dots, m, l = 1, \dots, \theta, t = 1, \dots, \pi \quad (8.5)$$

$$y_{klt} \leq \sum_{j \in s(l)} y_{kj(t+1)} \quad k = 1, \dots, m, l = 1, \dots, \theta, t = 0, 1, \dots, \pi - 1 \quad (8.6)$$

$$G(1 - y_{klt}) \geq \sum_{q=l}^{\theta} y_{(k-1)qt} \quad k = 2, 3, \dots, m, l = 1, 2, \dots, \theta, t = 1, 2, \dots, \pi \quad (8.7)$$

$$\sum_{l=1}^{\theta} y_{klt} = 1 \quad k = 1, \dots, m, \quad t = 1, \dots, \pi \quad (8.8)$$

$$\sum_{t=h}^{\pi} t(w_{jkt} - w_{ikt}) \geq h - G(1 - x_{ijk}) \quad i, j = 1, \dots, n, i \neq j, k = 1, \dots, m \quad (8.9)$$

$$\sum_{t=h}^{\pi} (w_{jkt} + w_{ikt}) - 1 \leq x_{ijk} + x_{jik} \quad i, j = 1, \dots, n, i \neq j, k = 1, \dots, m \quad (8.10)$$

$$x_{ijk}, w_{ikt}, y_{klt} \in \{0, 1\} \quad i, j = 1, \dots, n, k = 1, \dots, m, t = 1, \dots, \pi, l = 1, \dots, \theta \quad (8.11)$$

El objetivo del modelo es minimizar el tiempo total de operación de de las grúas de explanada de manera que se minimice el tiempo que esperan los vehículos que movilizan los contenedores dentro de la terminal. Los autores además de considerar el tiempo necesario para cada tarea, consideran los tiempos de desplazamiento entre los bloques, de manera que, si ya se completo una tarea pero la grúa no esta lista a la llegada del vehículo, esto ocasionara una demora adicional. La zona de explanada es uno de los recursos más críticos de las terminales portuarias ya que de su optimización y buen funcionamiento depende el buen funcionamiento de muchas otras operativas ya analizadas anteriormente.

En la tabla 10 se realiza una clasificación de las referencias más relevantes entre las que fueron consultadas para la programación y optimización de grúas de explanada.

Tabla 10 Clasificación de los trabajos enfocados a la programación y optimización de las grúas de explanada

Trabajo	Modelo	Metodología de resolución	objetivo
Alessandri et al (2008)	Proceso algorítmico	Metaheurística	Minimizar utilización del recurso
Soriguera et al (2006)	Modelo de simulación	Simulación	Evaluar estrategias
Ng y Mak (2005a)	IP	Heurística	Minimizar tiempo de espera
Ng (2005)	IP	Heurística	Minimizar tiempo de espera
Matthew et al (2009)	Modelo de simulación	Simulación	Evaluación de soluciones
Jung y Kim (2006)	LP	Heurística	Minimizar tiempo de espera
Zyngiridis (2005)	IP	Heurística	Minimizar distancias
Lee et al (2007)	MIP	Heurística	Minimizar tiempo de espera
Ng y Mak (2005b)	IP	Heurística	Minimizar tiempo de espera
Zhang et al (2002)	MIP	Heurística	Minimizar tiempos