

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR

DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



# **INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO**

## **División de Estudios de Posgrado e Investigación**

### **PROYECTO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO CONTAINER TERMINAL MANAGEMENT SYSTEM**

**Usuario: INFRAESTRUCTURA PORTUARIA MEXICANA S.A. DE C.V**

#### **Participantes:**

**Dra. Laura Cruz Reyes (Líder del Proyecto)**

**Dra. Claudia Gpe. Gómez Santillán**

**Dr. Héctor J. Fraire Huacuja**

**Dr. Javier González Barbosa**

**Dra. Lucila Morales Rodríguez**

**Dr. José Antonio Martínez Flores**

**Dra. Guadalupe Castilla Valdez**

**Enero de 2014**

## Tabla de contenido

1. Introducción.....	1
2. Descripción de Infraestructura Portuaria Mexicana (IPM).....	1
3. Logística de contenedores y problemas de optimización en IPM .....	3
4. Estado del arte .....	4
5. Desarrollo tecnológico.....	5
5.1 Objetivos .....	5
5.2 Metodología de solución .....	6
5.3 Avances del Desarrollo.....	7
5.4 Productos derivados del Desarrollo.....	8
5.5 Contribuciones del Cuerpo Académico.....	8
5.6 Problema de atraque de buques (Berth Allocation Problem, BAP).....	9
5.7 Problema de asignación dinámica de espacio (Dynamic Space Allocation Problema, DSAP).....	16
5.8 Modelo matemático para el apilamiento de contenedores de exportación.....	17
5.9 Heurístico de solución para el problema de estiba de contenedores en buque (CSSP) .....	20
5.10 Modelo matemático de QCSP para la planificación de grúas de patio.....	22
5.11 Algoritmo metaheurístico híbrido para QCSP y QCAP.....	23
5.12 Experimentación.....	29
5.13 Conclusiones .....	30
Referencias .....	30

## **1. Introducción**

Hoy en día, las empresas portuarias buscan optimizar su terminal como un todo. Sin embargo, existen muy pocos sistemas de cómputo comerciales (Mainsail, Spinnaker y Navis) que ofrecen soluciones a este problema de alta complejidad. Los productos comerciales como los de investigadores solo abordan parte de la problemática y los estudios comparativos son limitados. En suma, las opciones existentes no satisfacen totalmente los requerimientos de servicio y en algunos casos, ni de costo-beneficio.

Mediante colaboración, el cuerpo académico en Optimización Inteligente del Instituto Tecnológico de Ciudad Madero (ITCM) y la empresa Infraestructura Portuaria Mexicana (IPM), con el soporte de expertos en desarrollo de software (FORTIA), plantea optimizar los procesos de planificación en la logística de contenedores, que generalmente es realizados por expertos humanos dedicados de tiempo completo a esta tarea.

El presente proyecto plantea un enfoque de solución basado en optimización heurística para la empresa Infraestructura Portuaria Mexicana (IPM). Con este enfoque es posible, en diferentes horizontes de tiempo: (1) Reducir el tiempo de planificación a minutos, (2) detectar oportunamente desviaciones, y (3) posibilitar el análisis de escenarios. De acuerdo con la literatura, estas tareas complejas inciden directamente en el costo de la operación.

## **2. Descripción de Infraestructura Portuaria Mexicana (IPM)**

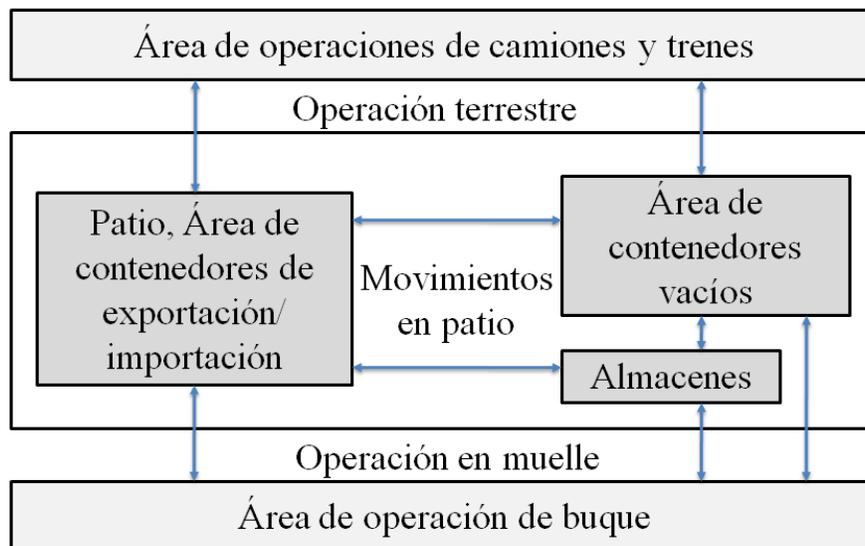
Infraestructura Portuaria Mexicana (IPM) es una empresa ubicada dentro del complejo industrial de Altamira, Tamaulipas. Ésta empresa está dedicada al envío y recepción de mercancías a través de buques, camiones o trenes. Las mercancías generalmente deben ser ubicadas dentro de contenedores, los más utilizados en la industria, son los contenedores de 20 y 40 pies. Los contenedores además se dividen en refrigerantes o abiertos los cuales tienen una nomenclatura especial según sus características particulares, de acuerdo a las normativas internacionales. IPM utiliza para dicho fin estándares internacionales de productividad, precisión, calidad y eficiencia basados en las normativas ISO 6346. En promedio en IPM se manejan alrededor de 150,000 contenedores por año en un total de 420 buques.

Los principales objetivos de IPM son el ser una empresa de talla mundial en ingeniería, construcción y operación de grandes proyectos de infraestructura así como ser líder de la industria en el mercado latinoamericano. Para dicho fin se requiere minimizar los tiempos de ejecución de todos los procesos de logística de contenedores que se realizan en la terminal.

Al conjunto de operaciones de transporte, carga y descarga de contenedores generalmente es llamado “*Logística de contenedores*”. Estas operaciones están reguladas por estrictas normas internacionales que especifican la forma de almacenamiento de contenedores y la ubicación correspondiente [1, 2].

Desde sus inicios, en IPM se han designado ambiciosos planes de trabajo y fuertes inversiones, que incluye principalmente la adquisición de equipo con tecnología de punta para la realización óptima de cada operación, principalmente las operaciones relacionadas con la carga de mercancías mediante contenedores.

La terminal portuaria de IPM cuenta con cinco áreas (ver Figura 1): área de operación de camiones, patio para contenedores, patio para almacén, patio para contenedores vacíos y área para operación de buque. En la Figura 1 se pueden identificar tres tipos de operaciones: (1) operación terrestre, (2) movimientos en patio y (3) operación en muelle. Los procesos que se abordan en este proyecto, para su optimización, están relacionados con las operaciones que tienen lugar en patio y muelle.



**Figura 1.** Elementos de la terminal portuaria IPM.

### 3. Logística de contenedores y problemas de optimización en IPM

El manejo de las operaciones requeridas para dar servicio a un buque comienza con el arribo de los contenedores a la terminal. Estos contenedores generan un problema de asignación dinámica de espacio (Dynamic Space Allocation Problema, **DSAP** por sus siglas en inglés). Los contenedores no tienen un orden de arribo y deben ser almacenados de tal forma que permita minimizar las operaciones de las grúas de patio. Estas grúas ubican los contenedores en camiones que los transportan a muelle.

Una vez concluido el proceso de acomodo de contenedores en patio, éstos quedan en espera del arribo de su buque correspondiente. Las terminales portuarias sólo tienen un espacio muy limitado para la atención simultánea de buques. Cuando arriban más buques de los que pueden ser atendidos se genera un problema de atraque de buques (Bert Allocation Problem, **BAP** por sus siglas en inglés). Dar solución a BAP requiere conocer ciertas características del buque como la distribución de sus tareas de carga y descarga de contenedores. La cual es evaluada de acuerdo a la cantidad de grúas de muelle disponibles.

La planeación de la estiba de un barco es un proceso en dos pasos. El primer paso es ejecutado por la compañía naviera. La planeación de estiba de una línea naviera generalmente actúa sobre categorías de contenedores. En el segundo paso, los contenedores por categoría son asignados a posiciones específicas dentro del barco. Este problema es conocido como Planeación de Estiba en Embarcaciones de Contenedores (Container Ship Stowage Problema, **CSSP**, por sus siglas en inglés), y recientemente sólo Planeación de Estiba (Stowage Planning).

Asignar una  $n$  cantidad de grúas a los buques que arriban es denominado en la literatura como Quay Crane Assignment Problem, **QCAP** por sus siglas en inglés. Estas grúas al ser asignadas al buque requieren una programación de tareas para cumplir con los requerimientos de carga y descarga. El problema es denominado Quay Crane Scheduling Problem o **QCSP** por sus siglas en inglés, y genera el tiempo requerido para cargar y descargar el buque.

La Tabla 1 presenta para cada problema, los parámetros de entrada, las salidas esperadas, así como la unidad de medición de la función objetivo de minimización.

**Tabla 1.** Problemas de optimización abordados

<b>Problema</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>Unidad de Medición</b>
<b>DSAP*</b>	Cantidad de bahías disponibles.	Conjunto de bahías mínimo requerido para realizar un apilamiento de diversos contenedores.	Bahías
<b>CSSP*</b>	Requerimientos de carga y descarga de contenedores	Ubicación de contenedores en buque	Tiempo
<b>BAP*</b>	Cantidad de buques a ser atendidos en un horizonte de tiempo	Secuencia de ingreso y salida de los buques en la terminal	Tiempo
<b>QCAP*</b>	Tareas a ser realizadas en un buque.	Cantidad de grúas necesarias para realizar las tareas en un tiempo mínimo	Tiempo
<b>QCSP*</b>	Conjunto de tareas a ser realizadas y las grúas asignadas a dicho conjunto de tareas.	Secuencia de movimientos de grúas para realizar las tareas en un tiempo mínimo	Tiempo

Todos los problemas mencionados son parte de la logística de contenedores de una terminal portuaria y deben ser abordados considerando sus interrelaciones para mejorar la calidad en el servicio de la misma. Durante el presente desarrollo tecnológico se plantea un modelo que englobe a todos estos problemas.

#### **4. Estado del arte**

Los problemas de la Tabla 2 tienen una complejidad computacional (NP-duro) que los hace inviables de resolver mediante algoritmos deterministas. Diversos autores proponen modelos de programación matemática para dar solución a problemas que surgen en los procesos de una terminal portuaria. Debido a que generalmente las soluciones exactas están limitadas a instancias de pequeña a mediana escala, se han propuesto soluciones mediante algoritmos aproximados. Los trabajos de la Tabla 2 abordan un solo problema de los cinco mencionados, son pocos los que consideran sus interrelaciones; a lo más abordan simultáneamente dos de éstos.

**Tabla 2.** Soluciones de la literatura para problemas de optimización de puertos

<b>Autor</b>	<b>Problema</b>	<b>Descripción</b>	<b>Método de Solución</b>
Jean-François Cordeau [3]	SAP	Asignación de tareas según el servicio del contenedor	Algoritmo memético que integra un algoritmo genético con una búsqueda tabú refinada
Sciomachen, A., Tanfani, E [4]	CSSP	Ubicación de contenedores en buque	Algoritmo de empaçado (Bin packing de tres dimensiones) ajustado para resolver el problema de planeación de la carga del buque.
Jordan Gergov [5]	DSAP	Ubicación de contenedores en patio	Diseña un método de solución utilizando coloreado de grafos.
Yongpei Guana; Wen-Qiang Xiao [6]	BAP	Modela el arribo de los buques a puerto	Heurístico para resolver el problema de multiprocesos
Frank Meisel, Christian Bierwirth [7]	QCAP	Asignación de grúas a buque.	Algoritmo genético que resuelve BAP y QCAP de forma simultánea.
Marcello Sammarra [8]	QCSP	Organización de la tareas de las grúas de muelle	Implementación del modelo de Kim y Park [9] mediante búsqueda tabu.

## 5. Desarrollo tecnológico

El proyecto general está planeado para desarrollarse por etapas. El presente proyecto aborda la primera etapa que es de exploración; la finalidad es estudiar los cinco problemas de optimización involucrados y, dar una primera solución a la empresa portuaria participante. La experimentación preliminar ha mostrado un ahorro sustancial en los tiempos de operación; pasando de horas a minutos. En las siguientes etapas se abordarán cada uno de los problemas para obtener soluciones competitivas con los mejores del estado del arte.

### 5.1. Objetivos

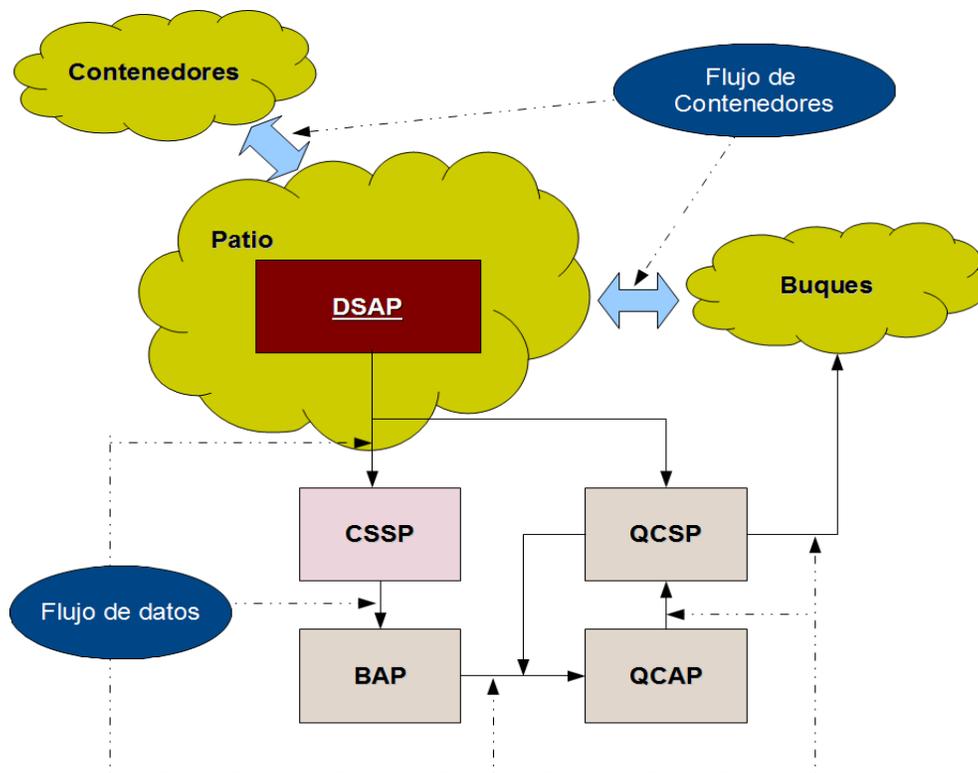
El objetivo general es desarrollar un sistema de solución integral basado en algoritmos heurísticos para optimizar los procesos de una terminal portuaria formulados en un modelo de operación que

incluye los problemas DSAP, CSSP, BAP, QCSP y QCAP, y centra su eficiencia en QCSP. Como objetivos específicos se plantean los siguientes:

- Asignar espacio en patio para el almacenamiento de contenedores.
- Generar una distribución de carga de contenedores para el buque.
- Planificar las operaciones realizadas por las grúas al momento de carga y descarga de un buque.

## 5.2 Metodología de Solución

Los problemas abordados conllevan una secuencia de solución ordenada. La Figura 2 presenta un diagrama de flujo propuesto para interrelacionar los diferentes procesos que resuelven cada uno de los problemas de la Tabla 1. Estos procesos son abordados en un horizonte de tiempo conforme se presentan diversas situaciones en la terminal.



**Figura 2.** Secuencia de entradas y salidas de los procesos de optimización de IPM

El desarrollo de la siguiente solución está orientado a explorar todos los problemas y a abordar con mayor profundidad la solución del problema QCAP con el algoritmo metaheurístico GRASP. Debido a que QCAP no es un problema aislado, para los problemas relacionados se plantean soluciones simplificadas con métodos heurísticos inspirados en la experiencia humana de IMP. El modelo de operación sigue el flujo mostrado en la Figura 2.

1. Generar soluciones factibles para el problema **DSAP**, estas soluciones se realizan en diversos horizontes de tiempo y no dependen de ningún otro problema.
2. Una vez concluido uno de los horizontes de tiempo deberán solucionarse las instancias **CSSP** generadas a partir de los datos obtenidos al solucionar los problemas DSAP.
3. Con la carga generada del buque, dada por CSSP, se obtiene una lista de tareas de los buques en espera de arribar a la terminal. Con dicha carga se completan los datos para la instancia **BAP**, con esta información se determina la secuencia de entrada y salida de los buques a la terminal.
4. Cuando solo se requiera atender un buque es necesario asignar una cantidad de grúas para la realización de las tareas. Esta es una instancia **QCAP** que será resuelta evaluando diversas combinaciones de instancias para QCSP.
5. Al contar con una cantidad de tareas asignadas y grúas se genera una instancia **QCSP** que se resuelve mediante una hibridación de GRASP con un Sistema de Colonias de Hormigas (ACS, Ant Colony System por sus siglas en inglés).

### 5. 3 Avances del Desarrollo

- Desarrollo de un algoritmo metaheurístico (GRASP con ACS) para la solución del problema QCSP formulado con el modelo de programación matemática de Kim y Park [9]
- Implementación de un algoritmo de ramificación y acotamiento (Branch and Bound) para resolver de manera exacta instancias del QCSP planteadas en la literatura. Las soluciones exactas de instancias pequeñas permite evaluar parcialmente la eficiencia del algoritmo metaheurístico propuesto.
- Desarrollo de los algoritmos heurísticos requeridos en el modelo de operación propuesto para la solución de los problemas de Logística de Contenedores (ver Figura 2).
- Revisión y ajustes a los diversos algoritmos propuestos.

- La experimentación preliminar ha mostrado un ahorro sustancial en los tiempos de operación; pasando de horas a minutos (menos de 5 minutos).
- Integración de los módulos en una librería para facilitar la portabilidad del software científico.
- Realizar ajustes para integrar la librería del software científico en el sistema de información desarrollado por la empresa FORTIA.

#### **5.4 Productos derivados del Desarrollo**

En este proyecto participaron dos estudiantes de licenciatura en un proyecto de residencia profesional. Se realizó una tesis de maestría denominada “Logística de Contenedores para una Terminal Portuaria” desarrollada por el estudiante Arturo Lam Álvarez. Actualmente se lleva a cabo la tesis doctoral de la estudiante Paula Hernández Hernández, cuyo título es “Planeación del Estibado en Buque usando Metaheurísticas” .

En cuestión de publicaciones se ha elaborado las siguientes:

“Constructive Algorithm for a Benchmark in Ship Stowage Planning”. Cruz Reyes, L., Hernández H., P., Melin, P., Fraire Huacuja, H. J., & Mar O., J. (2013). (O. C., P. M., & J. K., Eds.) Recent Advances on Hybrid Intelligent Systems, 451, 393-408.

“An Ant Colony Algorithm for Improving Ship Stability in the Containership Stowage Problem”. Paula Hernández Hernández, Laura Cruz Reyes, Patricia Melin, Julio Mar-Ortiz, Héctor Joaquín Fraire Huacuja, Héctor José Puga Soberanes, Juan Javier González Barbosa. (2013). Félix Castro, Alexander F. Gelbukh, Miguel González (Eds.). Advances in Soft Computing and Its Applications, 93-104.

#### **5.5 Contribuciones del cuerpo académico**

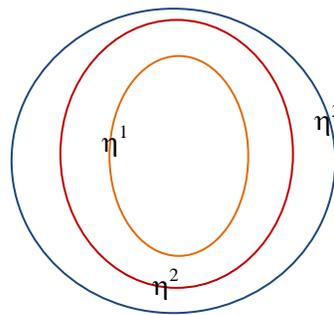
Participan siete profesores pertenecientes a dos programas en Ciencias de la Computación (maestría y doctorado) del ITCM. La Dra. Laura Cruz Reyes es la líder del proyecto y responsable ante PROMEP del cuerpo académico participante. Los doctores Laura Cruz Reyes, Claudia Gpe. Gómez Santillán y Héctor J. Fraire Huacuja son responsables del desarrollo de algoritmos heurísticos originales. La Dra. Cruz aporta métodos de caracterización del proceso de optimización, la Dra. Gómez aporta métodos de afinación de parámetros de control y el Dr. Fraire Huacuja aporta métodos de búsqueda local para la gran escala con apoyo del Dr. Javier González Barbosa y la Dra.

Guadalupe Castilla Valdez, quien también sigue esta línea de trabajo. La Dra. Lucila Morales Rodríguez es responsable del simulador en 3D del movimiento de grúas. El Dr. José Antonio Martínez Flores es responsable del diseño de protocolos para la construcción de la librería portable y estandarizada.

### 5.6 Problema de atraque de buques (Berth Allocation Problem, BAP)

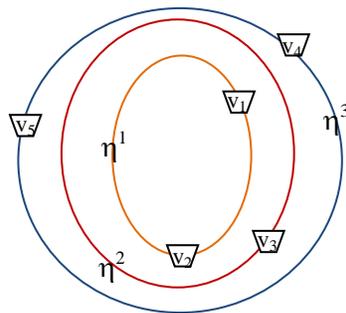
Los buques siguen una ruta preestablecida denominada Ruta Naviera, la cual recorre diversos puertos alrededor del mundo. Dichas rutas son recorridas mediante buques en intervalos de tiempo “regulares”. Como forma de simplificación supondremos que los buques recorren la ruta en un lapso de tiempo uniforme para poder modelar su recorrido de forma semicircular.

El conjunto de rutas está representado por  $N = \{\eta^1, \eta^2, \eta^3, \dots, \eta^{|\mathcal{N}|}\}$  (ver Figura 3).



**Figura 3.** Conjunto de rutas navieras

Los buques que recorren una ruta naviera están preasignados a dicha ruta y son los únicos que pueden recorrerla\*. El conjunto total de buques se representa por  $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_{|V|}\}$ , y todos los buques pertenecen solo a una ruta, de tal forma que todas las rutas tienen por lo menos un buque asignado como se aprecia en la Figura 4.



**Figura 4.** Rutas navieras con sus buques asignados

El tiempo de rotación de cualquier buque que recorre la ruta  $\eta^i$  está definido como  $\gamma(\eta^i)$ . Este tiempo indica el tiempo total que requiere un buque para recorrer la ruta, sin embargo puede sufrir alteraciones como se ha reflejado en los registros históricos. Estos retrasos o posibles mejoras en el

tiempo de recorrido de un buque están definidos por  $\lambda_{v_j}^T$ . El cálculo de esta variable se expresa en la ecuación (1).

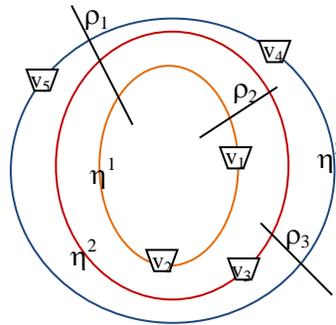
La modificación en los tiempos de ruta define el tiempo total de recorrido de una ruta como:

$$\gamma(\eta^i) = \max\{\gamma(v_j) + \lambda_{v_j}^T\} \quad \forall v_j \in V^i \quad (1)$$

La función  $\gamma$  calcula el tiempo máximo requerido por un buque para recorrer la ruta  $\eta^i$ . Cada una de las correspondientes  $\lambda_{v_j}^T$  registradas tendrá una probabilidad de ocurrencia variante conforme las observaciones realizadas en diversos lapsos de tiempo en la ruta.

Durante el recorrido de una ruta, los buques llegan a diversas terminales portuarias que son las que conforman la ruta naviera, estas terminales son intersectadas por diferentes rutas comerciales y se representan en el grafo como líneas (ver Figura 5).

Las terminales portuarias están representadas en el conjunto  $P = \{\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_{|P|}\}$ , todas las terminales están asignadas al menos a una ruta.



**Figura 5.** Radar con las rutas navieras, sus buques asignados y las intersecciones con las terminales portuarias

En base a lo planteado podemos definir cada ruta naviera como  $\eta^i = (V^i, P^i)$  donde  $V^i \subset V$  y  $P^i \subset P$ . En donde los conjuntos  $V^i$  son disjuntos y los  $P^i$  son no disjuntos. Cada una de las terminales representa un periodo de tiempo de espera o posible retraso al buque, ya sea por problemas en la carga, revisiones por parte de las autoridades locales o el estado del clima en ese lugar, así como también pueden significar una mejora en los tiempos si despachan el buque en un menor tiempo estimado.

Todos esos tiempos conforman  $\lambda_{v_i}^T$  el cual se divide en fragmentos de acuerdo a la cantidad de terminales que recorra la ruta, cada uno de estos fragmentos tiene un tiempo de recorrido propio, por lo que  $\lambda_{v_i}^T$  es igual a la suma de los retrasos o avances en el recorrido de los fragmentos más el tiempo necesario por la terminal para despachar el buque. Para una ruta  $i$ -ésima que contiene  $|P^i|$  terminales el  $\lambda_{v_j}^T$  de un buque está definido en la ecuación (2).

$$\lambda_{v_j}^T = \sum_{k=1}^{|P^i|} \lambda_{v_i}^k \quad \forall v_j \in V^i \quad (2)$$

La Figura 5 muestra un caso de aplicación del modelo visual propuesto para describir la logística de contenedores como una figura de tipo radar. Utilizando este radar de la Figura 5 se puede observar y predecir, con una mayor facilidad, las actividades de cada una de las terminales en diversos periodos de tiempo. En un periodo determinado la terminal  $\rho_i$  deberá dar servicio a los buques  $v_1$ ,  $v_3$  y  $v_4$  de forma simultánea, donde deberá resolver el problema de ubicación de los buques, asignación de grúas para cada buque y demás problemas que generan.

Una orden de servicio de un buque llega a una terminal portuaria y se inicia el proceso de arribo de contenedores a la terminal, este punto es indicado como  $\tau_0^v$ . El punto de terminación del periodo es el día que se espera arribe el buque y este punto está indicado como  $\tau_1^v$ . Los puntos intermedios entre el inicio y fin del arribo de contenedores correspondientes a un buque a la terminal están definidos en la ecuación (3) y se muestra tabularmente en la Figura 6.

$$\tau_0^v + k \quad \forall 0 \leq k \leq K, \text{ siendo } K = \tau_1^v - \tau_0^v \quad (3)$$

$v^j$ :	$\tau_0^1$	$\tau_0^1 + 1$	$\tau_0^1 + 2$	$\tau_0^1 + 3$	$\tau_0^1 + \dots$	$\tau_0^1 + k - 1$	$\tau_1^1 = \tau_0^1 + K$
---------	------------	----------------	----------------	----------------	--------------------	--------------------	---------------------------

**Figura 6.** Esquema para indicar los tiempos de arribo de contenedores a una terminal

Los buques tienen una distribución de probabilidad que indica la cantidad en que arribarán los contenedores. En IPM los expertos en logística han determinado que un 10% tiene una alta probabilidad de arribar después de transcurrido el 90% del tiempo del periodo  $\tau_0^v + K - 1$ .

La distribución que se utilizará como base para detallar el arribo de contenedores es la exponencial. Para cada buque se asignará una probabilidad de arribo por cada periodo de tiempo  $\tau_0^v + k$ . Esta probabilidad será la suma de las probabilidades de arribo de los contenedores de cada puerto destino a donde serán enviados dichos contenedores mediante el buque.

Realizando un ejemplo de apilamiento de órdenes de arribo de contenedores y sus respectivos buques podemos mostrar la forma en que estos arribarán a la terminal, como se muestra en la Figura 7. Cada renglón representa el tiempo en que los contenedores para el buque  $v^j$  deberán llegar a la terminal portuaria. Los periodos están representados en la parte inferior de la Figura 7, un conjunto de periodos formará una época, que será el espacio de búsqueda utilizado para medir la densidad de los contenedores que se espera arriben a la terminal.

La cantidad de bahías probables a ocupar más las que están en uso, está representada por  $\alpha_{\tau}^i$ , donde  $i$  representa el buque donde serán cargados y el índice  $\tau$  el valor de  $\tau_0^v + k$  correspondiente al periodo. Con la finalidad de mejorar la calidad del producto, las probabilidades obtenidas en la distribución teórica se ajustarán en base a las observaciones obtenidas en cada uno de los periodos de tiempo que se realice el análisis. Una época  $\varepsilon = \{t_0, t_0 + 1, t_0 + 2, \dots, t_0 + k - 1, t_1\}$  es el conjunto que especificará la cantidad de periodos que desean ser analizados durante dicha época.

$v^1: \alpha_0^1$	$\alpha_1^1$	$\alpha_2^1$	$\alpha_{\dots}^1$	$\alpha_T^1$
	$v^2: \alpha_1^2$	$\alpha_2^2$	$\alpha_3^2$	$\alpha_T^2$

		$v^3:\alpha^3_2$	$\alpha^3_3$	$\alpha^3_{\dots}$	$\alpha^3_T$	
		$v^4:\alpha^4_2$	$\alpha^4_3$	$\alpha^4_{\dots}$		$\alpha^4_T$
$t_0$	$t_0+1$	$t_0+2$	$t_0+3$	...	$t_0+k-1$	$t_l$

**Figura 7.** Representación de las demandas de bahías en una época con  $n$  periodos de tiempo.

Cuando seleccionamos un periodo de tiempo en nuestra época podemos determinar la cantidad de bahías necesarias para almacenar los contenedores en la terminal, tal como se muestra en la Figura 8. La cantidad de bahías necesarias en cada periodo indicará si se deberán endurecer las restricciones de almacenamiento para aumentar el nivel de apilamiento de los diversos contenedores que se espera arriben a la terminal o si es posible realizar un acomodo que mejore los tiempos de carga en el buque.

←Número de bahías ocupadas		Tiempo actual	Número de bahías que se espera ocupar →			
		Selección				
$v^1:\alpha^1_0$	$\alpha^1_1$	$\alpha^1_2$	$\alpha^1_{\dots}$	$\alpha^1_T$		
	$v^2:\alpha^2_0$	$\alpha^2_1$	$\alpha^2_2$	$\alpha^2_T$		
		$v^3:\alpha^3_0$	$\alpha^3_1$	$\alpha^3_2$	$\alpha^3_T$	
		$v^4:\alpha^4_0$	$\alpha^4_1$	$\alpha^4_2$	$\alpha^4_3$	$\alpha^4_{\dots}$ $\alpha^4_T$
$t_0$	$t_0+1$	$t_0+2$	$t_0+3$	...		$t_l$

**Figura 8.** Selección de un periodo de tiempo en la época

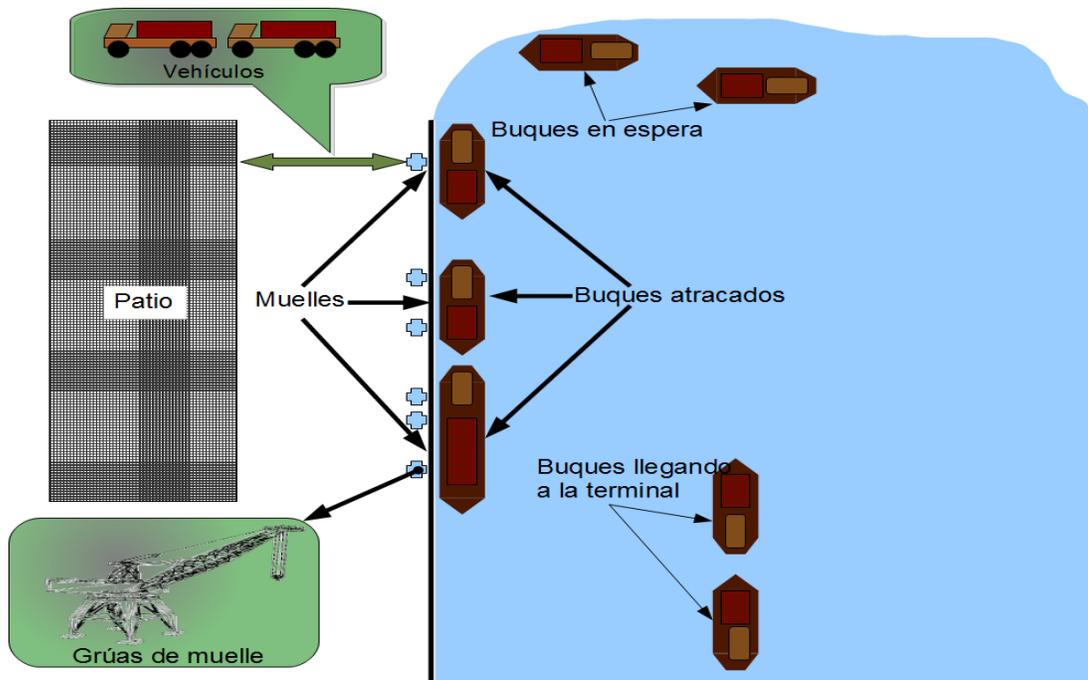
En la Figura 8, seleccionamos el periodo de tiempo  $t_3$  donde se espera utilizar  $\alpha^1_2 + \alpha^2_1 + \alpha^3_0 + \alpha^4_0$  bahías. También en la Figura 8, en la parte de selección observamos cuántas bahías se espera utilizar en la terminal, y cuántas están siendo utilizadas en dicho periodo.

Cada una de las  $\alpha^i_\tau$  es igual a la suma de sus predecesores de esta manera podemos realizar pronósticos sobre la cantidad esperada de contenedores en un periodo  $t_0+k$ , con un margen de error correspondiente a la probabilidad de ocurrencia de dicha carga.

La probabilidad de ocurrencia del arribo de los contenedores aumenta si en un lapso anterior el arribo real fue menor al esperado y disminuye en caso contrario. De igual forma la cantidad esperada de contenedores para dicho buque deberá aumentar o disminuir en un porcentaje representativo de la diferencia observada para poder mejorar el desempeño del sistema.

Las terminales portuarias reciben una gran cantidad de buques en diversos lapsos de tiempo, cuando se reciben más buques de los que pueden ser atendidos de forma simultánea se genera un problema de atraque de buques. El objetivo de este problema es el de buscar la mejor combinación de buques y su secuencia de atraque que minimicé el tiempo de estancia de todos los buques en la terminal. Mejorando así la efectividad en las operaciones.

La Figura 9 muestra un diagrama de los estados que toma un buque en su arribo a la terminal y la cantidad de equipo necesario para poder atender cada uno.



**Figura 9.** Diagrama de operación de una terminal portuaria.

Existen diversos métodos que solucionan este problema en base a un tiempo de completado aproximado de las tareas de cada buque. En este documento se plantea una solución a este problema midiendo el tiempo de completado de cada conjunto de buques.

Un conjunto de buques atracados representa una instancia para los problemas de QCAP y QCSP. Como forma de simplificación se utilizarán todas las grúas disponibles para generar la primera combinación de buques.

En la Figura 9 se aprecian ocho buques que deben ser atendidos en el menor tiempo posible. La terminal portuaria cuenta con capacidad para atender únicamente tres buques de forma simultánea. Serán seleccionados aquellos buques cuya carga de trabajo permita minimizar el tiempo total de estancia de todos los buques.

La entrada que recibe este problema de acuerdo al ejemplo de la Figura 9 se ilustra en la Figura 10 que representa una instancia para el BAP.

Buque	Tareas a realizar	Bahías
$v^1$	20	40
$v^2$	10	30
$v^3$	40	50
$v^4$	50	50
$v^5$	30	50
$v^6$	15	30
$v^7$	45	50
$v^8$	35	50

**Figura 10.** Instancia BAP

Explotando la solución que genera el modelo matemático de Kim y Park se evalúan las diversas combinaciones de buques.

Ejemplo:

El algoritmo evalúa la combinación de buques  $\{v^1, v^4, v^7\}$  el cual genera una instancia para QCAP, donde se tiene un total de 105 tareas distribuidas a lo largo de 140 bahías. Al ser la capacidad máxima de carga del buque, se asignan todas las grúas disponibles lo cual pasa a ser una instancia QCSP. Al resolver este primer bloque se obtiene el tiempo de terminación de cada buque realizando una análisis a la solución generada por el algoritmo híbrido GRASP – SCH. Una solución QCSP se ilustra en la Figura 11.

```
Solution:38
Tasks || CurrentTime:: min || Bays
0 4   || 8 30           :: 8   || 1 6
2 4   || 20 22          :: 20  || 3 6
1 4   || 10 2           :: 2   || 2 6
1 3   || 8 5            :: 5   || 2 5
1 3   || 3 0            :: 3   || 2 5
```

**Figura 11.** Solución para una instancia QCSP

En esta solución se aprecian tres columnas de datos. La primera y la tercera columna están divididas en dos sub columnas, donde cada una representa una secuencia de tareas y bahías, respectivamente, para cada grúa de muelle. La columna central está dividida en dos secciones. La primera sección representa el tiempo de terminación de cada tarea asignada en ese estado a cada una de las grúas de muelle. La segunda sección de la columna dos muestra el tiempo mínimo entre las grúas el cual es utilizado para indicar cuál de las grúas se moverá hacia su siguiente tarea. Para nuestra solución BAP se utilizara únicamente la columna uno donde estarán indicadas las tareas a realizar.

Para dar una solución que permita reducir el tiempo de estancia en cada buque, por cada combinación se intercalará el orden de los buques para minimizar de esta forma la cantidad de combinaciones generadas en nuestro algoritmo.

Al evaluar los buques  $\{v^1, v^4, v^7\}$  se obtienen las siguientes instancias QCSP. Donde cada combinación de buques genera una nueva instancia QCSP.

<b>Tareas</b>	1	2	...	20	21	22	...	70	71	72	...	104
<b>Bahía</b>	1	1	...	40	41	43	...	70	73	73	...	136
<b>Tiempo requerido</b>	6	7	...	2	9	4	...	7	6	4	...	3
<b>Restricciones</b>	Para $v^1$				Para $v^4$				Para $v^7$			

**Figura 12.** Primera instancia para  $\{v^1, v^4, v^7\}$

El resto de las instancias son combinaciones realizadas intercalando el muelle donde atracara cada buque. Una siguiente combinación probable seria ordenas los buques en el orden  $\{v^4, v^1, v^7\}$

En nuestro ejemplo de BAP cuando las tareas de las bahías uno a cuarenta estén completadas indicara al algoritmo que el buque  $v^1$  ha finalizado sus tareas y puede partir del muelle para permitir el acceso al siguiente buque.

El BAP es solucionado mediante un algoritmo genético que buscará la mejor secuencia de atraque para los buques deseados. Una solución aleatoria requiere evaluar la primera combinación de buques y de acuerdo a se terminen las tareas de cada buque realizar el intercambio con el siguiente buque. A modo de simplificación se generará una instancia QCSP con el arribo del siguiente buque, dejando el tiempo de inicio de las nuevas tareas como la cantidad de tiempo que requiere el buque para atracar en su posición indicada.

Se plantea un algoritmo poblacional basado en el sistema de colonia de hormigas básico que busque en el espacio de soluciones. No estarán contemplados cambios imprevistos como desperfectos en las grúas ya que estos se tomaran como una instancia en caso de ocurrir.

Una solución al BAP queda de la siguiente forma:

Buques	Tiempo de terminación	Mínimo	En espera
{v1,v2,v4}	{40,50,80}	40	{v3,v5,v6,v7,v8}
{v7,v2,v4}	{90,10,40}	10	{v3,v5,v6,v8}
{v7,v5,v4}	{90,40,30}	30	{v3,v6,v8}
{v7,v5,v3}	{60,10,30}	10	{v6,v8}
{v7,v8,v3}	{50,70,20}	20	{v6}
{v7,v8,v6}	{50,70,60}	50	{}

**Figura 13.** Solución al problema BAP

El tiempo computacional requerido por este algoritmo es grande aun en instancias pequeñas, por lo que es necesario realizar un estudio posterior que permita simplificar algunos procesos o evaluaciones para mejorar los tiempos de cómputo requeridos. La solución generada es óptima pues evalúa a detalle cada una de las combinaciones en base a las grúas disponibles en el horizonte de tiempo a evaluar y la mejor secuencia encontrada.

Algoritmo genético de solución para el BAP.

1. Ordenar buques de acuerdo a su carga de trabajo.
2. Generar primera generación aleatoria
  - a. Mientras no se cumpla condición de paro
    - i. Generar nueva población mediante cruza.
    - ii. Mutar nueva generación
    - iii. Evaluar nueva generación mediante GRASP.
3. Obtener individuos elite
4. Aplicar GRASP-ACS a la población elite.
5. Retornar mejor solución.

## 5.7 Problema de asignación dinámica de espacio (Dynamic Space Allocation Problema, DSAP)

La forma como los contenedores deben acomodarse dentro de esas bahías se modela como un problema de Bin Packing con cola de objetos (BPP-Q).

Los contenedores arribarán a la terminal con una probabilidad determinada en el modelo donde cada uno de los  $\chi^v_\tau$  será igual a la suma de sus predecesores más la cantidad esperada que arriben a la terminal. El primer bloque de contenedores del buque-destino  $v^i$  tendrá la menor probabilidad de ocurrencia y el último la mayor probabilidad, conforme avanza el periodo  $t_0 + k$  la probabilidad de cada  $\chi^v_\tau$  aumentará.

$\Delta^v_\tau$  es el valor máximo esperado de contenedores que recibirá  $\chi^v_\tau$  en el periodo de tiempo  $t_0 + k$

La cantidad de contenedores a ser ubicados se determina en la ecuación (4), multiplicando el valor esperado por la probabilidad de ocurrencia, es decir:

$$\chi^v_\tau = \chi^v_{\tau-1} + P(\Delta^v_\tau) * \Delta^v_\tau \quad (4)$$

La cantidad de bahías  $\alpha^v_\tau$  necesarias para albergar los  $\chi^v_\tau$  contenedores en el periodo  $t_0 + k$  se obtiene solucionando el problema de BPP mediante la siguiente heurística.

- Los contenedores buscarán una posición dentro de la bahía bajo los siguientes criterios
  - Los contenedores serán apilados de acuerdo a su peso, donde los más pesados estarán en la última fila de la bahía y los más ligeros al inicio.
  - Un contenedor no podrá tener otro contenedor de mayor peso sobre él.
    - Si no existe una solución factible para el acomodo, esta condición puede ser omitida.
  - Serán ubicados de acuerdo a su peso en la bahía que les corresponda.
    - Si no existen pilas con su mismo peso disponibles, serán ubicados en la pila inmediata siguiente.
      - Si la siguiente pila es de menor peso que el contenedor:
        - Serán ubicados en otra bahía si está disponible
        - Serán ubicados en esa bahía si no existen más bahías disponibles para dicho contenedor.

La cantidad total de bahías utilizadas en el periodo  $t_0 + k$  está sujeta a la probabilidad de retrasos que pueden ocurrir en cada  $t_0 + k$ . Esto se da ya que un retraso de un periodo de tiempo en un buque aumenta la cantidad de bahías utilizadas en la terminal. Al aumentar la diferencia entre el periodo de tiempo actual y el periodo de tiempo  $t_0 + k$  deseado, la probabilidad de eficiencia del modelo disminuye al no poder medir de forma exacta los retrasos en los buques. Esta probabilidad se mide en la ecuación (5), donde la probabilidad de retraso de todos los buques es equivalente a la probabilidad de que las bahías  $\beta^i$  no se desocupen ó dicho en otras palabras, sigan ocupadas:

$$P(X = \alpha^v_{\tau-1}) = \prod_{v^i \in V^i} P(\lambda^j_{v^i}) \quad \forall i=1,2,3 \dots V^i \quad (5)$$

Al determinar la probabilidad de retraso de los buques, multiplicamos este valor por la cantidad de bahías que se espera desocupar en el lapso de tiempo  $t_0 + k - 1$ , obteniendo así el número mínimo

de bahías que probablemente permanezcan ocupadas en el periodo mencionado. Este valor se refleja en la ecuación (6) y se representa como  $w$ . Donde  $\Omega$  es igual a 0 si  $t_0 + k - 1$  es el periodo actual a ser evaluado y 1 si es una proyección a futuro.

$$w = \Omega * \sum_{t_0+k-1 \in \varepsilon} \sum_{i=1}^{|B|} (\beta^i * P(\alpha_{\tau-1}^v)) \quad (6)$$

Las épocas deberán tener un lapso de tiempo superior al menor de los periodos de tiempo que utilicen los  $v_i$ . De esta forma la ecuación (7) limita el tamaño mínimo de una época.

$$\varepsilon > \min \{ \sum_{v \in V, \tau=t_0}^{t_1} \alpha_{\tau}^v \} \quad (7)$$

### 5.8 Modelo matemático propuesto para el apilamiento de contenedores de exportación

Las terminales portuarias en este caso particular IPM, utilizan secciones de tamaño fijo para almacenar los contenedores dentro de la terminal, estas secciones son cuatro:

1. Zona de contenedores de exportación
2. Zona de contenedores de importación
3. Zona de contenedores vacíos
4. Zona de contenedores en revisión

Cada una de estas secciones está dividida en áreas, el conjunto de áreas que agrupa estas zonas está definido por:

$$A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_{|A|}\}$$

Cada  $a_i$  agrupa un número finito de bahías, las cuales están numeradas de forma par o impar de acuerdo al tipo de contenedor  $r$  que almacenan.

El conjunto total de bahías de una terminal portuaria está definido en el conjunto  $B = \{b^1, b^2, b^3, \dots, b^{|B|}\}$ , donde cada sección  $a_i$  tiene un número de bahías fijas.

Las bahías utilizan un número específico de pilas numeradas (de acuerdo a su fila correspondiente dentro del esquema de división de la terminal) para almacenar los contenedores dentro de sí. Estas pilas tienen un nivel de apilamiento de acuerdo a la grúa utilizada para dicho fin. La formulación del problema estará conformada por las siguientes variables:

Variables de entrada

- A Número de áreas utilizadas para almacenar los contenedores de exportación.
- $a_i$  Identificador utilizado para indicar un área de almacenamiento, su valor es alfanumérico.
- B Número total de bahías existentes en el área de exportación.
- $b_j$  Identificador de la bahía utilizada para almacenar o retirar un contenedor. Tiene un valor alfanumérico e inicia siempre con el valor de su  $a_i$  correspondiente.
- $l_b$  Limite de apilamiento máximo permitido para la bahía  $b_j$

- $V^*$  Conjunto total de buques-destinos de las rutas que intersectan la terminal portuaria.
- $v^i$  Conjunto de destinos que deberá recorrer el buque  $v_i$ . Estos destinos están especificados en el conjunto  $\eta^i$  que les corresponde a cada  $v_i$
- $r$  Tipos de contenedores de acuerdo a su tamaño
- $\varphi$  Tipos de contenedores especiales
- $C$  Conjunto universal de contenedores
- $c_i$  Contenedor de tipo  $r$  y  $\varphi$ ,  $c_i \in C$
- $c_{i,j}^b$  Contenedor de tipo  $r$  y  $\varphi$  ubicado en la bahía  $b$ , pila  $i$ , nivel  $j$ .
- $\varepsilon$  Época de tiempo donde arribaran los contenedores de los buques-destinos  $v^j$  a la terminal
- $t_i$  Periodo de tiempo de una época donde  $i$  tomara el valor de 0 al inicio de dicha época y 1 al final de la misma.
- $n$  Cantidad de periodos de tiempo  $t_i$  utilizados en una época.
- $w$  Cantidad bahías que probablemente permanezcan ocupadas en el periodo anterior a  $t_0 + k$

#### VARIABLES DE DECISIÓN

- $\beta^i$  1 si la bahía  $b^i$  tiene al menos un contenedor en el periodo de tiempo  $t_0 + k$ , 0 si está vacía.  
 $0 \leq k \leq n$
- $\zeta_{i,j}$  0 si los contenedores  $c_i$  y  $c_j$  son del mismo tipo  $r$  y  $\varphi$ , 1 si son diferentes
- $\pi_{c,v}$  0 si el contenedor  $c$  pertenece al buque-destino  $v$ , 1 si no pertenece a ese destino.

El objetivo principal del problema es el de minimizar el total de las bahías utilizadas en la terminal portuaria en una época con  $n$  periodos de tiempo para el almacenamiento de los contenedores de exportación.

Función objetivo:

$$\min \sum_{t_0+k \in \varepsilon} \left\{ \sum_{i=1}^{|B|} \beta^i + w \right\} \quad \forall i=1,2,3.., i \in B, 0 \leq k \leq n \quad (8)$$

Sujeto a:

Los contenedores no pueden mezclarse si son de diferente tipo de esta manera la Restricción (9) obliga que no existan contenedores de diferentes tipos en las bahías. Esto se logra al verificar que todos los contenedores de cada bahía sean de diferente tipo.

$$\sum_{k \in B} \sum_{i \in b_k} \sum_{j=i+1}^{|b_k|} s_{i,j} = 0 \quad \forall b, i, k, j=1,2,\dots \quad (9)$$

Las grúas de patio utilizadas limitan el tamaño máximo de una pila, sin embargo los algoritmos requieren que esta restricción pueda ser evaluada por tanto la Restricción (10) verifica que no exista un mayor apilamiento en una bahía cuyo límite de contenedores es  $l_b$

$$\sum_{j \in b^k} c_{i,j}^b \leq l_b \quad \forall b, i, k, j=1,2,\dots \quad (10)$$

Todos los contenedores de una bahía deben corresponder al mismo buque-destino, esto se verifica utilizando la Restricción (11)

$$\sum_{c \in b_k, v \in v^i} \pi_{c,v} = 0 \quad \forall k=1,2,\dots,|B|; c \in C; v^i \in V \quad (11)$$

El número de bahías utilizadas no debe ser superior a la cantidad de bahías asignadas a la sección de exportación lo cual se define en la Restricción (12).

$$\sum_{i=1}^{|B|} \beta^i \leq |B| \quad \forall i=1,2,\dots,|B| \quad (12)$$

Este conjunto de restricciones permite optimizar el uso de las bahías. Las bahías representan la unidad para medir el uso del espacio en la terminal.

Una vez terminado el apilamiento de los contenedores correspondientes al buque-destino  $v^i$ , es decir, se alcanzó  $\alpha^v$ . Se debe buscar una forma de acomodarlos de manera ordenada dentro del buque. Esto se realiza creando bloques de diferentes dimensiones donde cada bloque corresponde a un puerto a ser descargado.

## **5.9 Heurístico de solución para el problema de estiba de contenedores en buque (CSSP).**

Un experto proporciona los bloques del buque donde deberán ser acomodados los contenedores. Estos bloques serán llenados siguiendo la siguiente heurística.

1. Ubicamos la parte central del bloque con respecto a sus bahías como la sección inicial de carga.
2. Se ordenan los contenedores por conjunto y cada conjunto se ordena por peso, de mayor a menor
3. Mientras existan contenedores por cargar en el buque
  - 3.1. Colocamos los contenedores en el bloque asignado para cada conjunto.
    - 3.1.1. Se toma un contenedor del conjunto ordenado y se ubica en la siguiente fila de la bahía disponible dentro del bloque.
    - 3.1.2. Si el contenedor inferior es más grande que el actual se utiliza la siguiente bahía disponible a la derecha del bloque. Si no existen a la derecha se carga hacia la izquierda.
    - 3.1.3. Si no existen bahías disponibles se busca su posición a partir del centro en un nivel superior.
      - 3.1.3.1. Solo podrán ubicarse contenedores en un nivel superior que sean de mayor o igual tamaño que el contenedor inferior.
  - 3.2. Se revisa el peso de cada intersección bahía-fila, verificando que no se rompa la restricción de límite de peso

### **Evaluación de la solución**

Una vez terminada la ubicación de los contenedores en el buque, se crean bloques de tareas de acuerdo a los siguientes criterios:

1. Se crea un grupo inicial por cada bahía que va a contener los contenedores de exportación.
2. Cada grupo se divide en dos grupos, el primero corresponde a los contenedores de bodega y el segundo a los contenedores en cubierta.
3. Los grupos generados son divididos de acuerdo a su destino.

El conjunto de grupos restante se sub dividirá a su vez de la siguiente forma:

- i. Seleccionamos un grupo de forma aleatoria mientras el conjunto total de grupos sea menor a cien.
- ii. Si el grupo adyacente al seleccionado tiene un nivel diferente, el grupo de menor nivel será el límite para indicar un nuevo grupo. Es decir, el conjunto de mayor

nivel será dividido en dos partes, la primera tendrá la altura del grupo de menor nivel y el resto será un nuevo grupo.

- iii. Si los grupos cuentan con un nivel superior a cinco, serán divididos en grupos con un nivel de apilamiento de tres.

### **5.10 Modelo matemático de QCSP para la planificación de grúas de patio.**

Las grúas de patio realizan la carga y descarga de los contenedores en el buque, el cual es un proceso crucial que requiere ser optimizado en aras de mejorar la calidad del servicio de una terminal portuaria.

El objetivo principal de este problema es la obtención de una secuencia de carga y descarga de grúas de muelle.

#### **Índices utilizados**

$i, j$  Tareas ordenadas de forma ascendente

$k$  Grúas de muelle (QCs) ordenadas de forma ascendente según su posición de la bahía correspondiente

#### **Información del problema**

$p_i$  Tiempo requerido para realizar la tarea  $i$

$r_k$  Tiempo en que la QC  $k$  estará disponible

$l_i$  Ubicación de la tarea  $i$  de acuerdo a su número de bahía

$l^0$  Posición inicial de la QC  $k$  indicado por el número de bahía

$l^T_k$  Posición final de la QC  $k$  grúa en número de bahía

$t_{i,j}$  Tiempo de viaje de la QC desde  $l_i$  hasta  $l_j$ ,  $t^k_{0j}$  y  $t^k_{jT}$  representan el tiempo de viaje desde la posición inicial  $l^0_k$  de la QC  $k$  hasta la posición  $l_j$  de la tarea  $j$ , y de la ubicación  $l_j$  al destino final  $l^T_k$  de la QC  $k$ .

$M$  Constante suficientemente grande

$\alpha_1$  Peso del tiempo máximo de terminación.

$\alpha_2$  Peso del tiempo total de terminación.

#### **Conjunto de índices**

$\Omega$  Conjunto de todas las tareas.

$\Psi$  Conjunto de pares de tareas que no se pueden realizar al mismo tiempo.

$\Phi$  Conjunto de pares ordenados entre los cuales hay una relación de precedencia. Cuando  $i$  debe realizarse antes de  $j$  se dice que  $(i, j) \in \Phi$

### Variables de decisión

$$x_{ij}^k \begin{cases} 1 & \text{QC } k \text{ hace } j \text{ después de } i, \text{ o sea la primera o última tarea.} \\ 0 & \text{sino.} \end{cases}$$

$Y_k$  Tiempo de terminación de la QC  $k$

$D_i$  Tiempo de realización de  $i$

$$z_{ij} \begin{cases} 1 & \text{Si } j \text{ inicia después de la terminación de } i \\ 0 & \text{Sino.} \end{cases}$$

$W$  Tiempo en que se realizan todas las tareas.

### Modelo Matemático QCSP

$$(1) \quad \min \alpha_1 * W + \alpha_2 \sum_{k=1}^K Y_k$$

Siendo  $\alpha_1 > \alpha_2$

Consiste en minimizar el tiempo de terminación de las grúas, pero su principal objetivo es minimizar la carga de trabajo individual de cada grúa para que esté disponible para otras labores.

#### Sujeto a:

$$(2) \quad Y_k \leq W$$

Evalúa la carga de trabajo.

$$(3) \quad \sum_{j \in \Omega} X_{0j}^k = 1 \quad \forall k = 1, \dots, |K|$$

Esta restricción selecciona la primera tarea a ser realizada

$$(4) \quad \sum_{i \in \Omega} X_{iT}^k = 1 \quad \forall k = 1, \dots, |K|$$

Selecciona la última tarea a realizarse.

$$(5) \quad \sum_k \sum_{i \in \Omega} X_{ij}^k = 1 \quad \forall j \in \Omega$$

Verifica que todas las tareas se realizan únicamente por una sola grúa.

$$(6) \quad \sum_j X_{ij}^k - \sum_j X_{ji}^k = 0 \quad \forall i \in \Omega; \forall k = 1, \dots, |K|$$

Esta restricción nos garantiza que el flujo de las tareas se haga en una secuencia bien definida.

$$(7) \quad D_i + t_{ij} + p_j - D_j \leq M(1 - X_{ij}^k) \quad \forall i, j \in \Omega; \forall k=1, \dots, |K|$$

Determina el tiempo de terminación para cada tarea a la vez que elimina sub rutinas.

$$(8) \quad D_i + p_j \leq D_j \quad \forall (i, j) \in \Phi$$

Denota que  $i$  debe realizarse antes que  $j$ . Si estas pertenecen al conjunto  $\Phi$

$$(9) \quad D_i - D_j + p_j \leq M(1 - Z_{ij}) \quad \forall i, j \in \Omega$$

Define  $Z_{ij}$  tal que  $Z_{ij} = 1$  cuando  $j$  inicia después del tiempo de terminación de  $i$ , 0 si ocurre lo contrario.

$$(10) \quad Z_{ij} + Z_{ji} = 1 \quad \forall (i, j) \in \Psi$$

Garantiza que  $i$  y  $j$  no se realicen al mismo tiempo si  $(i, j) \in \Psi$

$$(11) \quad \sum_{v=1}^K \sum_{u \in \Omega} X_{uj}^v - \sum_{v=1}^K \sum_{u \in \Omega} X_{ui}^v \leq M(Z_{ij} + Z_{ji}) \quad \forall i, j \in \Omega; l_i < l_j; k=1, \dots, |K|$$

Eliminamos la interferencia que ocurren entre las grúas cuando estas realizan tareas.

$$(12) \quad D_j + t_{jT}^k - Y_k \leq M(1 - X_{jT}^k) \quad \forall j \in \Omega; k=1, \dots, |K|$$

Tiempo de terminación de cada QC

$$(13) \quad r_k - D_j + t_{0j}^k + p_j \leq M(1 - X_{0j}^k) \quad \forall j \in \Omega; k=1, \dots, |K|$$

Restringe el tiempo de inicio de las operaciones de cada QC

$$(14) \quad \text{Define los valores de } X_{ij}^k, Z_{ij} = 0 \text{ ó } 1 \quad \forall i, j \in \Omega; k=1, \dots, |K|$$

$$(15) \quad \text{Define los valores de } Y_k, D_i \geq 0 \quad \forall i, j \in \Omega; k=1, \dots, |K|$$

### 5.11 Algoritmo metaheurístico híbrido para QCSP y QCAP.

Para poder realizar una implementación de este modelo utilizando colonia de hormigas es necesario introducir los siguientes conceptos.

Utilizaremos el método “**Branch and Bound**” para generar soluciones factibles que permitan minimizar el tiempo requerido para esta tarea.

El método de “**Branch and Bound**” explora un árbol de soluciones desde la raíz 0, hacia los nodos en los niveles superiores donde:

1. La profundidad del árbol es el número de tareas

2. Un nodo en el nivel  $i$  del árbol de soluciones corresponde a una solución parcial que consiste de la 1° hasta la  $i$ -ésima posición.

**Notaciones:**

$W_k$  Conjunto de tareas asignadas a las QC  $k$ .

$S_k$  Secuencia de tareas asignadas a QC  $k$ .

$c_k$  Tiempo de terminación de la QC  $k$  en el nodo actual del árbol de soluciones.

$l_k^c$  Posición de la QC  $k$  después de la última tarea en  $S_k$  que se está realizando en el nodo actual.

En el nodo raíz del árbol de búsqueda de soluciones

$$\forall k, W_k = \emptyset, S_k = ( ), c_k = 0 \text{ y } l_k^c = l_k^0$$

En cada nodo una solución se representa como  $\{S_k\} 1 \leq k \leq |K|$

**Algoritmo “Branch and Bound”**

1. Iniciar
2. Seleccionamos la siguiente rama del nodo
  - a. Hasta encontrar una solución factible, se realiza una primera búsqueda por profundidad.
    - i. Seleccionamos el nodo con el menor valor entre los nuevos nodos de la rama
    - ii. Continuamos la búsqueda por profundidad hasta encontrar la primera solución factible.
  - b. Seleccionamos la siguiente solución después de encontrar la primera solución.
    - i. Después de hacer una búsqueda por profundidad
      1. Todos los nodos con soluciones parciales serán soluciones candidatas para la siguiente solución
      2. La selección será igual, buscando el mínimo.
3. Crear soluciones factibles desde la rama del nodo
  - a. Entre  $S_j, j=1, \dots, K$  seleccionamos la secuencia  $S_k$  con el menos valor  $c_k$ . De esta forma cada tarea pendiente es asignada a la secuencia para crear un nodo hijo.
  - b. Mientras tanto: Tareas que violen la restricción (8) que evaluar la precedencia o interfieran entre las QCs (restricciones (10) y (11) son eliminadas).
4. Eliminar los nodos “dominados”.
  - a. Supongamos que más de un nodo tienen los mismos elementos  $W_k$  y el valor de  $l_k^c$  de todos sus  $k$ . El nodo  $a$  se dice que está dominado por el nodo  $b$ , si el nodo  $a$  tiene un valor  $ck$  menor o igual que el nodo  $b$  para todos sus  $k$ , y, al menos un  $k$ , el nodo  $a$  tiene un valor de  $c_k$  estrictamente menor que el nodo  $b$ . Todos los nodos dominados por otros son eliminados.
5. Calcular el límite inferior de los nodos hijos.

- Para cada nodo, se calcula su límite inferior y compara con el límite mayor de la función objetivo óptima.
- Si el límite menor es mayor que el superior el sub-árbol deja de ser explorado.
- Cuando las ubicaciones de las QCs y tareas faltantes son dados en un intervalo de  $(I_k^c, I_{k+1}^c)$  este se divide en varias partes por las posiciones de las tareas faltantes.
- Sean  $U(=\Omega - \cup_{k \in C} W_k)$  el conjunto de tareas faltantes y el tamaño de la  $i$ -ésima partición es denotado por  $u_{ki}$  expresado en unidades de tiempo de viaje de las QCs.
- Entonces para un nodo en el árbol de búsqueda, un valor menor en la función objetivo óptima puede ser expresado.

$$\text{Límite Inferior (LB) 1} = \max \{ \max_k c_k, b_m \} \quad (16)$$

Donde

$$b_m = \frac{1}{K} \{ \sum_{k \in C} c_k + \sum_{i \in U} p_i + QC_{viaje} \} \quad (17)$$

$$QC_{viaje} = t_i + t_b + t_r \quad (18)$$

$$t_i = \max_{j \in U} \{ l_1^c - l_j, 0 \} \quad (19)$$

$t_i$  es el límite inferior en el tiempo de viaje requerido por una QC para hacer la tarea más hacia la izquierda.

Sea  $(I_k^c, I_{k+1}^c)$  dividido en  $m$  particiones de acuerdo a las posiciones de las tareas restantes entonces para poder cubrir las tareas entre las QCs consecutivas por lo menos se deben cubrir  $(m - 1)$  particiones por los movimientos de las QCs.

$$t_b = \sum_{k=1}^{K-1} U_k \quad (20)$$

Donde  $U_k$  es la suma mínima de los tamaños de las particiones de  $(m - 1)$ ,  $U_k$  se convierte en el límite inferior en el tiempo de viaje requerido por las QCs para completar todas las tareas en cada QC  $k$  y  $k+1$  por lo tanto  $(t_i + t_r + t_b)$  es igual al límite inferior de viaje para completar todas las tareas restantes entre la QC  $k$  y QC  $k+1$ .

De esta forma:

$$\sum_{k \in C} c_k + \sum_{i \in U} p_i + t_i + t_r + t_b \quad (21)$$

Es menor o igual que el mínimo de tiempo de terminación de las QCs. Por lo tanto la carga de trabajo óptima debe ser mayor o igual que el tiempo total de terminación dividido entre las QCs.

Así que (16) es el límite inferior en el valor de la función objetivo.

$$LB 2 = LB 1$$

Las tareas de las QCs están ubicadas en una línea recta. La ubicación óptima de las tareas de las QCs tiene la forma de soluciones que se pueden obtener de la siguiente forma.

- Particionar cada intervalo  $(I_k^c, I_{k+1}^c)$  en izquierdo y derecho, en sub-intervalos. Entonces ubica las tareas en el sub-intervalo izquierdo a QC  $k$  y las tareas en el sub-intervalo derecho a QC  $k+1$ .
- Para encontrar la ubicación óptima es suficiente enumerar todos los posibles puntos de particiones que resulten en diferentes posiciones de las tareas de las QCs.
- Al ser las tareas asignadas a las QCs se minimiza el tiempo de viaje como sigue:

$$QC_{\text{viaje}} = \sum_{k=1}^K t_k \quad (23)$$

Donde

$$t_k = \max \{ (l_k^c - l_{kl}), (l_{kr} - l_k^c) \} + 2 \min \{ (l_k^c - l_{kl}), (l_{kr} - l_k^c) \} \quad (24)$$

$l_{kl}$  es la ubicación de la tarea más a la izquierda entre las tareas del lado izquierdo de la QC  $k$ .

$l_{kr}$  es la ubicación de la tarea más a la derecha entre las tareas del lado derecho de la QC  $k$ .

Supongamos que:

$l_k^c - l_{kl} \leq l_{kr} - l_k^c$ , entonces QC  $k$  puede minimizar su tiempo de viaje moviéndose a la ubicación de la tarea más a la izquierda primero y luego moviéndose a la ubicación de la tarea más a la derecha. En este caso el tiempo de viaje QC  $k$  será  $(l_{kr} - l_k^c) + 2(l_k^c - l_{kl})$ . Cuando  $l_k^c - l_{kl} > l_{kr} - l_k^c$ , el tiempo de viaje de QC  $k$  será  $(l_k^c - l_{kl}) + 2(l_{kr} - l_k^c)$ .

$l_{kl}$  y  $l_{kr}$  se convierten en  $l_k^c$  cuando no existen tareas a la izquierda o derecha de cada QC  $k$  respectivamente.

6. Detener la búsqueda cuando no queden más nodos con soluciones parciales.
  - a. Seleccionamos la agenda con la menor carga de trabajo. Si existen diversos nodos con la misma carga entonces seleccionamos el que tenga un menor tiempo de terminación.

**La primera colonia de hormigas será generada utilizando el método GRASP que consiste en:**

1. Entre todas las QCs, la QC con el menor  $c_k$  es seleccionada. En caso de empate se elige al azar entre las que tiene menor  $c_k$ .
  - i. Al usar este método para generar la primera generación seleccionaremos al azar una QC
2. Se construye un conjunto de tareas factibles para la siguiente operación de QC  $i$ . La primera operación se realizara en la posición inicial de la QC.
  - a. Este conjunto de operaciones se denota como  $F$ .

- i. Todas las tareas que violan varias restricciones (relaciones de precedencia entre tareas o interferencia entre las QCs) son excluidas de  $F$ . También todas las tareas  $j \in F$  con la siguiente condición.

$$\frac{1}{|l_i^c - l_j|} < r \max_{l \in F} \left\{ \frac{1}{|l_i^c - l_l|} \right\} \quad (25)$$

En donde  $r$  es una constante entre 0 y 1.

3. Asociamos las tareas  $j \in F$  con la siguiente probabilidad.

$$\frac{\left( \frac{1}{|l_i^c - l_j|} \right)}{\sum_{l \in F} \left( \frac{1}{|l_i^c - l_l|} \right)} \quad (26)$$

4. Seleccionamos al azar la tarea  $j \in F$  basándonos en la distribución de probabilidad (26).  
 5. Repetimos 1 – 5 hasta que todas las tareas sean asignadas.  
 De acuerdo con (25) y (26) las tareas lejos de QC serán excluidas como candidatas para la siguiente asignación de la QC ó tendrán una probabilidad muy baja de ser asignadas (26).

Mejorando la fase 2

Paso 0 :  $i = 0$

Paso 1:  $i = i + 1$

Si  $i > k$  detener

Si no

Seleccionamos QC  $i$  e ir a 2

Paso 2: Seleccionar un par de tareas que son asignadas a QC  $i$  y para las cuales la mayor mejora en  $\max_k \{C_k\}$  puede obtenerse realizando un intercambio por parejas con el método 2 – opt.

1. Si hay más de un par de tareas con la mejor  $\max_k \{C_k\}$  seleccionamos la tarea con el menor tiempo total de terminación.
2. Si la mejora es positiva realizamos el intercambio
  - a. Repetimos el paso hasta que no haya más mejoras posibles.
3. Si no hay mejoras posibles ir a 1

Aun cuando dos tareas de la misma QC se intercambian el tiempo de todas las QCs debe ser evaluado otra vez debido a la interferencia entre QCs.

### Criterios de paro

El procedimiento para la construcción de soluciones y el procedimiento para mejorar soluciones se realizar repetidamente hasta alcanzar el máximo número específico de soluciones.

La agenda con el tiempo mínimo de realización es la solución final del procedimiento GRASP.

## **Sistema de Colonia de Hormigas**

La primera Colonia de Hormigas será generada utilizando el algoritmo GRASP descrito anteriormente, sin embargo al GRASP no se le integrara la fase de mejora, debido a que este proceso será realizado por las hormigas.

Una solución para QCSP es una tabla de dos dimensiones, de tamaño  $n$  por  $q$ , siendo  $n$  el número de tareas a realizar y  $q$  la cantidad de grúas que serán utilizadas. La colonia de hormigas constara de  $n$  hormigas, cada una será una solución generada mediante GRASP de forma inicial. Este tamaño se considera debido a que en el peor de los casos una grúa realizara todas las tareas de la instancia.

### **Exploración**

La exploración se realizará seleccionando al azar una tarea de la grúa correspondiente y se realizará un recorrido en el árbol de búsqueda de soluciones iniciando desde el nodo seleccionado hasta completar la solución.

### **Explotación**

La tabla de feromona de la colonia de hormigas se genera utilizando la primera generación de soluciones generadas mediante GRASP. Dicha tabla permitirá a cada una de las hormigas seleccionar una tarea del conjunto de soluciones posible, seleccionando aquella que tenga un valor mayor en la tabla. La tabla de feromona actualiza sus estados con cada movimiento que la hormiga realiza, si la solución generada es factible, se realiza un refuerzo en dicha tabla, en caso contrario solo se continúa con la evaporación de la feromona.

### **Condiciones de Paro**

Se realizarán  $n$  generaciones con la siguiente condición.

Si en  $n/2$  generaciones se llega a un estancamiento en la solución serán elegidas las dos mejores soluciones de la generación y las demás serán sustituidas por una nueva generación seleccionada mediante GRASP. Este proceso será realizado  $n/3$  veces.

Las condiciones de paro serán:

Se han cumplido todas las generaciones posibles ó durante 10 generaciones no ha ocurrido un cambio en la mejor solución posible después de cambiar  $n/3$  veces las generaciones.

### **Construcción de las soluciones**

La solución estará constituida por:

$K$  partes que representan cada una de las grúas y cada hormiga contará con sus tareas seleccionadas.

Ejemplo:

Se tienen 2 grúas y 5 tareas entonces nuestra solución constara de 6 posiciones donde las primeras 3 serán de la grúa 1 y las siguientes de la grúa 2. Las posiciones faltantes serán llenadas con  $\emptyset$ .

1			2		
1	3	2	4	5	∅

Ejemplo:

Instancia I

$K=2$

$n=5$

$r=0.4$

$l_1^c=0$

$l_2^c=4$

Tarea(i)	1	2	3	4	5
$p_i$	8	10	20	5	30
$l_i$	1	2	3	5	6
$\psi = \{(1,2), (2,3), (3,4), (4,5)\}$			$\phi = \{ \}$		

Solución =

$k^1 = (1, 2, 3)$

$k^2 = (4, 5)$

Una vez calculada la secuencia óptima de tareas determinamos el tiempo total de completado con la siguiente ecuación que forma parte de la función objetivo de este modelo.

$$\sum_{k=1}^K Y_K$$

Se realizarán  $\chi$  interacciones con una cantidad diferente de grúas para evaluar cuál es el número óptimo de grúas necesarias para realizar las operaciones en dicho buque, lo que resuelve el problema de asignación de grúas QCAP.

## 5.12 Experimentación

Las instancias de prueba fueron generadas utilizando un generador de instancias desarrollado por Frank Meisel. Y es utilizado por diversos autores en la literatura para realizar diversos experimentos.

Para poder comparar nuestro algoritmo se implementó un algoritmo exacto (Branch and Bound).

Los resultados generados por el algoritmo exacto son iguales a los obtenidos por el algoritmo híbrido. Por lo que podemos concluir que la mejora sustancial del algoritmo híbrido está en el tiempo de ejecución.

Tareas	Grúas	Tiempo del algoritmo híbrido	Tiempo del algoritmo exacto	Valor Optimo
5	2	31 ms	32 ms	38
20	2	281 ms	5 días aprox.	130
50	4	9954 ms	16 días aprox.	808

### 5.13 Conclusiones

El presente desarrollo tecnológico ha sido concebido para IPM en el marco de acuerdos de colaboración. El análisis de requerimientos ha corrido a cargo del ITCM y de FORTIA. Los investigadores del ITCM son responsables de analizar y optimizar el proceso de Logística de Contenedores, guardando los aspectos de confiabilidad que le dan ventaja competitiva a la empresa. FORTIA es responsable de desarrollar un sistema de información que integre todos los procesos administrativos de IPM. Por su parte, IPM se compromete a proporcionar los datos y el acceso a las instalaciones y al personal relacionado con la Logística de Contenedores. La colaboración trae beneficios para todos los participantes. El ITCM puede publicar el trabajo científico desarrollado; FORTIA incrementa su madurez ante organismos certificadores; **IPM incrementa la satisfacción del usuario, reduce sus costos de operación hasta en un 20% y mejora su posicionamiento nacional y mundial.**

### Referencias

- [1] ISO 6346:1995, <http://www.iso.org/>, 1995.
- [2] Steenken, Dirk; et al. Container terminal operation and operations research-a classification and literature review. *OR Spectrum*, Volume 26, Number 1, 3-49, Springer-Verlag, 2004.
- [3] Jean-Francois Cordeau, Manlio Gaudioso, Gilbert Laporte and Luigi Moccia. The Service Allocation Problem at the Gioia Tauro Maritime Terminal, May, 2005.
- [4] Dirk Steenken. Container terminal operation and operations research a classification and literature review, 2004.
- [5] Jordan Gergov. Approximation algorithms for dynamic storage allocation, 1996.
- [6] Yongpei Guana, Wen-Qiang Xiao. A multiprocessor task scheduling model for berth allocation: heuristic and worst-case analysis, *Operations Research Letters* 30, pp. 343-350, 2002
- [7] Frank Meisel, Christian Bierwirth. Heuristics for the integration of crane productivity in the berth allocation problem, School of Economics and Business, May 2008.
- [8] Marcello Sammarra, Jean-Francois Cordeau. A Tabu Search Heuristic for the Quay Crane Scheduling Problem, 2006

- [9] Kap Hwan Kim, Young-Man Park. A crane scheduling method for port container terminals, Department of Industrial Engineering, Pusan National University, Changjeon-dong, Kumjeongku, Pusan, 609-735, South Korea, 2003
- [10] Diran Majarian. Profits and Growth Opportunities in Container Port Logistics Software, November, 2010.
- [11] M. Rebollo, Una sistema multi-agente para la automatización de terminales de contenedores, Universidad Politécnica de Valencia, 2002
- [12] Infraestructura Portuaria Mexicana S.A. de C.V., <http://www.ipmaltamira.com.mx/>
- [13] Diana Llobregat Villalba, Control de una terminal marítima de contenedores., Departamento de Sistemas Informáticos y Computación, Universidad Politécnica de Valencia, 2001
- [14] Eficiencia portuaria en Norteamérica, Zoe Infante Jiménez, Ariel Gutiérrez Ortiz, 2009
- [15] Wang, T. F., Song, D. W., & Cullinane, K. The Applicability of Data Envelopment Analysis to Efficiency Measurement of Container Ports. Proceedings of the International Association of Maritime Economist Conference, págs. 1-22. Panamá: IAME. 2002.
- [16] M. R. Garey, D. S. Johnson. Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness (Series of Books in the Mathematical Sciences), 1979.
- [17] Cristina Amil López, Historia de los puertos, 2004.
- [18] Loo Hay Lee, Ek Peng Chew, Kok Choon Tan and Yongbin Han, An optimization model for storage yard management in transshipment hubs, 2007.
- [19] Jordan Gergov, Approximation algorithms for dynamic storage allocation, 1996.
- [20] Frank Meisel, Christian Bierwirth, Heuristics for the integration of crane productivity in the berth allocation problem, School of Economics and Business, May 2008.
- [21] Sciomachen, A. and Tanfani, E. A 3d-bpp approach for optimising stowage plans and terminal productivity, European Journal of Operational Research 183: 1433–1446. 2007.
- [22] Basse S., Computer Algorithms, Introduction to Design and Analysis. Editorial Addison-Wesley Publishing Company, 1998.