



**Instituto Tecnológico
de Ciudad Madero**



División de Estudios de Posgrado e Investigación



"Logística de contenedores para una terminal portuaria"

Tesis para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Ciencias de la Computación

Presenta:

ISC. Arturo Lam Álvarez

Director de Tesis:

Dra. Laura Cruz Reyes

Co-director de tesis:

Dra. Claudia Guadalupe Gómez Santillán

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO



Cd. Madero, Tamps; a 26 de Noviembre de 2012.

OFICIO No.: U5.254/12
AREA: DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN
DE TESIS

**C. ING. ARTURO LAM ÁLVAREZ
PRESENTE**

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su examen de grado de Maestría en Ciencias en Ciencias de la Computación, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

“LOGÍSTICA DE CONTENEDORES PARA UNA TERMINAL PORTUARIA”

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación compartir con Usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE
“Por mi patria y por mi bien”

M. P. María Yolanda Chávez Cínco
M. P. MARÍA YOLANDA CHÁVEZ CÍNCO
JEFA DE LA DIVISIÓN



S. E. P.
DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E
INVESTIGACION
I T C M

c.c.p.- Archivo
Minuta

MYCHC 'NYCO' jar



Ave. 1°. de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz, Col. Los Mangos, C.P. 89440 Cd. Madero, Tam.
Tels. (833) 3 57 48 20, Fax: (833) 357 48 20, Ext. 1002, email: itcm@itcm.edu.mx
www.itcm.edu.mx



Declaración de originalidad

Declaro y prometo que este documento de tesis es producto de mi trabajo original y que no infringe los derechos de terceros, tales como derechos de publicación, derechos de autor, patentes y similares.

Además, declaro que en las citas textuales que he incluido (las cuales aparecen entre comillas) y en los resúmenes que he realizado de publicaciones ajenas, indico explícitamente los datos de los autores y las publicaciones.

En caso de infracción de los derechos de terceros derivados de este documento de tesis, acepto la responsabilidad de la infracción y relevo de ésta a mi director y co-directores de tesis, así como al Instituto Tecnológico de Ciudad Madero y sus autoridades.

22 de Febrero de 2013, Ciudad Madero, Tamaulipas.

ISC. Arturo Lam Álvarez

Resumen

Los puertos son un espacio diseñado para el intercambio de mercancías mediante barcos. Tienen una influencia muy importante en el desarrollo comercial y cultural de la zona donde están ubicados. La calidad de sus servicios se mide en el tiempo necesario para atender los buques mercantes, a menor tiempo, se considera una mejor calidad en el servicio y representa un mayor ingreso para la terminal portuaria.

Las operaciones de carga y descarga de contenedores metálicos, cargados con mercancías diversas, se pueden dividir en diferentes etapas. Dichas etapas inician cuando las agencias navieras informan a los puertos los contenedores que serán enviados a diversos destinos. Estos conjuntos de contenedores requieren ser almacenados de forma temporal en la terminal durante el tiempo que el buque arribe a puerto.

Las operaciones diarias de las terminales portuarias se engloban en el termino "*logística de contenedores*". En éste trabajo de tesis se modelaron los principales problemas involucrados en dicho proceso. Estos problemas fueron resueltos mediante la aplicación de algoritmos metaheurísticos. El conjunto de estos algoritmos así como la comunicación entre ellos generó el modelo Logistic-CPT que es un acrónimo del inglés de logística para contenedores en una terminal portuaria.

El objetivo principal de Logistic-CPT es el de minimizar el tiempo requerido por el personal de la terminal portuaria de IPM (Industria Portuaria Mexicana) para atender un buque. Las operaciones de carga y descarga de contenedores en el buque evaluá dicho tiempo. La solución para ése problema se comparo con las soluciones propuestas en la literatura especializada logrando una mejora en tiempo sin perdidas significativas de calidad en la solución.

El modelo y sistema desarrollado permite optimizar los procesos de las terminales portuarias. Ésto se logra al automatizar una parte importante de los mismos y al contar con una herramienta que proporciona buenas soluciones a los problemas planteados . Esto permite a la industria local mejorar la calidad de sus procesos y sus ingresos.

Índice general

Declaración de originalidad	I.
Resumen	II.
1. Introducción	4
1.1. Introducción	4
1.2. Antecedentes	5
1.3. Descripción del problema de investigación	6
1.4. Hipótesis	8
1.5. Objetivos	8
1.5.1. Objetivo general	8
1.5.2. Objetivos específicos	8
1.6. Justificación	9
1.7. Alcances y limitaciones	10
1.8. Organización del documento	11
2. Marco Teórico	12
2.1. Conceptos básicos de una terminal portuaria	12
2.1.1. Descripción de los procesos de la terminal portuaria IPM	12
2.1.2. Manejo de Contenedores	13
2.1.2.1. Acomodo de contenedores en patio	14
2.1.2.2. Área de contenedores vacíos	16
2.1.2.3. Área de contenedores de exportación	17
2.1.2.4. Área de contenedores retenidos	18
2.1.2.5. Zona de contenedores de importación	18
2.1.2.6. Manejo de los contenedores en buque	18
2.2. Problemas de la logística de contenedores	20
2.2.1. Problema de posicionamiento de contenedores en patio	21
2.2.2. Definición formal de CPP	23
2.2.2.1. Conceptos utilizados para el planteamiento del CPP	23
2.2.2.2. Función objetivo del CPP	25
2.2.2.3. Modelo matemático CPP	26
2.2.3. Definición formal de CSSP	27
2.2.4. Definición formal de BAP	29

2.2.5.	Definición formal de QCAP	30
2.2.6.	Definición formal de QCSP	30
2.2.6.1.	Modelo matemático de QCSP propuesto por Kim & Park.	31
3.	Estado del Arte	35
3.1.	Trabajos relacionados	35
3.2.	Software comercial existente	39
3.3.	Análisis del estado del arte	40
4.	Modelo de Solución	41
4.1.	Procesamiento de los contenedores	43
4.2.	Modelo de solución para el CPP	47
4.3.	Modelo de solución planteada para el CSSP	48
4.4.	Modelo de solución para el BAP	52
4.5.	Modelo de solución para el QCAP	52
4.6.	Modelo de solución para el QCSP	53
4.7.	Comunicación entre procesos	56
4.8.	Modelo de solución para Logistic-CPT	56
4.9.	Función objetivo para Logistic CPT	58
4.10.	Restricciones del estado del arte	58
4.11.	Restricciones particulares del caso de estudio	59
5.	Metodología de Solución	60
5.1.	Esquema general de solución	60
5.2.	Solución heurística para CPP	61
5.3.	Algoritmo poblacional para CSSP	63
5.4.	Algoritmo poblacional para BAP	68
5.5.	Modelo de solución para el QCAP	70
5.5.1.	Algoritmo genético para el QCAP	70
5.6.	Modelo de solución para el QCSP	71
5.6.1.	Algoritmo metaheurístico híbrido para el QCSP.	73
5.6.2.	Algoritmo Branch and Bound	74
5.6.3.	Algoritmo GRASP	77
5.7.	Algoritmo metaheurístico basado en GRASP y SCH para el QCSP.	79
6.	Experimentación y Resultados	80
6.1.	Resultados heurística CPP	81
6.2.	Resultados algoritmo poblacional para el CSSP	83
6.3.	Resultados algoritmo genético para el BAP	85
6.4.	Resultados algoritmo genético para el QCAP	85
6.5.	Resultados HACS-GRASP para el QCSP	87
6.6.	Pruebas estadísticas	88

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	3
7. Conclusiones y trabajo futuro	91
7.1. Conclusiones	91
7.2. Aportaciones	92
7.3. Trabajo futuro	93
A.	94
A.1. Configuración de patio para CSSP	94
B.	95
B.1. Detalle de las instancias BAP	95
C.	100

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

Las terminales portuarias son un punto estratégico para el desarrollo comercial de una región al constituir uno de los principales puntos de ingreso y envío de mercancías. Por esta razón es de gran importancia hacer mas eficiente y eficaz los procesos internos que realizan para llevar acabo sus operaciones diarias. El análisis y estudio de las operaciones realizadas dentro de las terminales marítimas permite localizar problemas que influyen en la calidad del servicio de la misma.

Los problemas identificados dentro de las terminales portuarias son catalogados debido a los componentes que intervienen en éstos. Dichos componentes son los contenedores donde serán almacenadas las mercancías, las zonas de la terminal destinadas para el almacenamiento de éstos, el equipo necesario para su transporte y ubicación dentro de la terminal, los buques donde serán transportados los contenedores y las grúas de muelle encargadas de cargar y descargar los contenedores de los buques. Cada uno de los componentes mencionados esta involucrado dentro de uno ó más problemas identificados en la literatura especializada generando una estrecha relación entre cada uno de los problemas identificados, esto ocurre cuando la solución de un problema se convierte en la información para generar la instancia de otro.[Meisel 2008].

Los componentes y problemas involucrados en las operaciones diarias forman un conjunto de problemas donde cada uno es NP-Duro [Garey y Jonson]. En base a esto es necesario aplicar métodos de solución que faciliten una comunicación entre los procesos y el personal involucrado en la toma de decisiones. Cada una de las soluciones generadas tendrá como fin mejorar el funcionamiento en general de la terminal y no unicamente el ser la mejor solución para dicho problema.

En este trabajo se define una serie de algoritmos heurísticos y metaheurísticos que den solución a una parte de los problemas identificados en la literatura especializada considerando la interacción entre cada uno de los procesos. La metodología propuesta genera un modelo de solución basado en módulos para crear una herramienta que genere un conjunto de soluciones factibles que mejoren el desempeño de la terminal.

1.2. Antecedentes

Industria Portuaria Mexicana (IPM) nació a finales de 1996, como resultado del programa de privatización de los puertos por parte del gobierno federal y con el fin de manejar la terminal de usos múltiples II de Altamira, Tamaulipas. Desde sus inicios en IPM se han designado planes de trabajo y fuertes inversiones, que incluyen la adquisición de equipo con tecnología de punta para realizar de forma óptima cada una de sus operaciones entre otras cosas, carga en general de mercancías [IPM].

IPM se dedica al envío y recepción de mercancías a través de buques, camiones o trenes. Las mercancías que se manejan dentro de la terminal, por lo general, deben ser ubicadas en contenedores metálicos. Uno de los principales objetivos de IPM es el convertirse en una empresa de talla mundial en ingeniería, construcción y operación de grandes proyectos de infraestructura, así como ser el líder de la industria en el mercado latinoamericano, para lograr dicho fin se requiere minimizar los tiempos de ejecución de todos los procesos de logística de contenedores que se realizan en la terminal.

Existen programas comerciales que realizan el proceso de logística de contenedores, los cuales tienen un costo muy elevado al requerir equipos especializados para realizar su tarea. Algunos de éstos programas citados por Diran [Diran 2010] son: Mainsail y Spinnaker de TideWorks; Navis desarrollado por Cargotec; Maher Terminals Logistic Systems creado por la compañía del mismo nombre; Advent Inc., Cosmos compañía nacida en Bélgica. De los sistemas antes mencionados Navis es el mejor calificado de acuerdo a Diran Majarian.

Como parte del estudio previo, Fortia Technology participó en un proceso de selección donde presentó su propuesta del Sistema Administrador de Terminales Portuarias (Container Terminal Management System, CTMS por sus siglas en inglés) con el cual compitió contra el sistema Navis. Factores como el costo-beneficio del sistema y costo de mantenimiento fueron los que otorgaron una amplia ventaja a Fortia para ser electa como la mejor opción. Una parte importante de CTMS es el módulo de optimización de procesos de combinatoria y decisión que se desarrollo en el proyecto de ésta tesis. El proyecto desa-

rollado en ésta tesis se denomina Logística para una terminal portuaria de contenedores (Logistic for a Container Port Terminal, Logistic-CPT, por sus siglas en inglés).

1.3. Descripción del problema de investigación

Una parte vital de las operaciones que se realizan en la terminal portuaria, es el movimiento de los contenedores. Este proceso inicia cuando un contenedor, debidamente etiquetado, ingresa en las instalaciones de la compañía, posteriormente es ubicado en patio y después en buque. Los procesos de carga y descarga de contenedores que se realizan en el muelle, donde están ubicados los buques, las grúas y el personal requerido para éstos procesos, son las operaciones que requieren mayor atención y cuidado al ser la que mayor costo representa en la terminal portuaria.

Una terminal portuaria cuenta principalmente con los siguientes elementos que se muestran en la Figura 1.1, donde se detallan el flujo de contenedores dentro de dicha terminal.

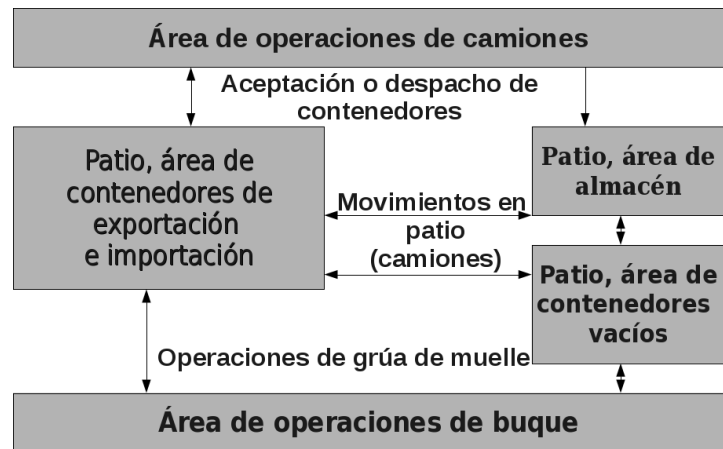


Figura 1.1: Flujo de contenedores en una terminal portuaria.

El manejo de las operaciones requeridas para dar servicio a un buque comienza con el arribo de los contenedores a la terminal. Esto conlleva a un problema de almacenamiento dinámico de contenedores (Container Positioning Problem, **CPP** por sus siglas en inglés) al no contar con una secuencia de arribo predeterminada. Los contenedores requieren ser almacenados de forma tal que permita minimizar las operaciones de grúas de patio requeridas para transportarlos a las grúas de muelle [L.K Sibbesen 2008].

Al termino del proceso de acomodo de contenedores en patio, éstos quedan en espera del arribo del buque donde serán almacenados. En ocasiones el buque no cuenta con la in-

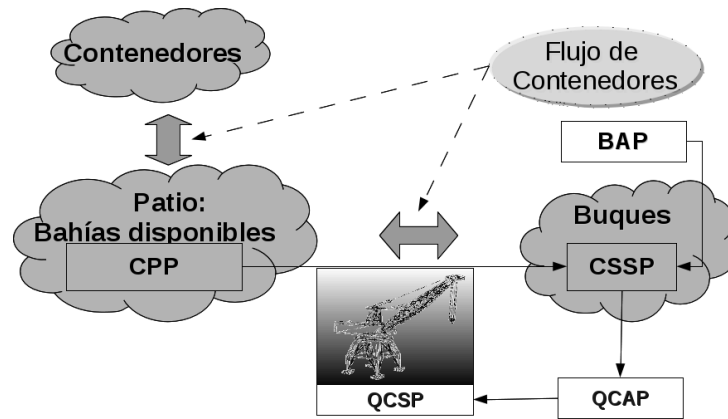


Figura 1.2: Problemas involucrados en la logística de contenedores

formación necesaria para ubicar los contenedores que se van a ser exportados; no tener dicha información del buque genera un problema de almacenamiento de contenedores en buque (Container Ship Stowage Problem, **CSSP** por sus siglas en inglés)[Ambrosino 2006].

Las terminales portuarias tienen un espacio limitado para atender una cantidad n de buques simultáneamente. Cuando arriban más buques de los que pueden ser atendidos se genera un problema de planificación de atraques (Berth Allocation Problem, **BAP** por sus siglas en inglés)[Vacca 2010]. Dar solución a BAP requiere conocer ciertas características del buque como la distribución de sus tareas de carga y descarga de contenedores. La solución que se obtenga está restringida por la cantidad de grúas de muelle disponibles en la terminal.

Asignar una k cantidad de grúas a los buques que arriban es un problema por la limitada cantidad de recursos con que cuentan los puertos. Este problema está identificado en la literatura especializada en el tema como Quay Crane Assignment Problem ó **QCAP** por sus siglas en inglés [Vacca 2010]. Una vez que se cuenta con las tareas de carga y descarga que serán realizadas en el buque se debe obtener una secuencia óptima de movimientos de grúa que permita minimizar los tiempos de estancia de los buques, este problema es denominado problema de programación de grúas de muelle (Quay Crane Scheduling Problem, **QCSP** por sus siglas en inglés), mediante el cual se obtiene el tiempo requerido para cargar y descargar el buque [Kim & Park 2004].

Todos los problemas identificados y su flujo de información se muestran en la Figura 1.2. Cada uno de los problemas mencionados son parte de la logística de contenedores de una terminal portuaria y deben ser abordados para mejorar la calidad en el servicio de la misma. En este documento se presenta un modelo computacional que engloba todos y cada

uno de éstos problemas. Dando más énfasis al problema de planificación de grúas de muelle debido al alto impacto que tiene en el tiempo de atención de un buque [Meisel 2010]. Los problemas descritos son abordados de forma individual o de manera conjunta la literatura especializada. Cada uno de ellos cuenta con un grado de complejidad alto y serán abordados a detalle en el capítulo 2.

1.4. Hipótesis

Automatizar los procesos de carga y descarga de contenedores de la empresa desarrollando una herramienta integral basada en métodos heurísticos, que permita automatizar los procesos descritos en la definición del problema. Ésta herramienta permitirá a dicha empresa:

- Reducir los costos de operación de sus procesos.
- Minimizar el tiempo requerido para la ubicación de los contenedores durante su paso por la terminal portuaria.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema de solución basada en algoritmos heurísticos para optimizar los procesos de una terminal portuaria formulados en el modelo de operación Logistic-CPT el cual incluye los problemas CPP, BAP, CSSP, QCAP y QCSP.

1.5.2. Objetivos específicos

1. Desarrollar para cada uno de los siguientes problemas de optimización un algoritmo heurístico que obtenga una solución razonable para las exigencias de una terminal portuaria, tanto en tiempo como en calidad.
 - a) Asignar espacio en patio para el almacenamiento de contenedores (CPP).
 - b) Generar una distribución de carga de contenedores para el buque (CSSP).
 - c) Obtener la cantidad mínima necesaria de grúas para cada buque atracado en el muelle de la terminal marítima (QCAP).

- d) Planificar las operaciones de carga y descarga de los contenedores de un buque utilizando grúas de muelle (QCSP).
 - e) Obtener la secuencia óptima de atraque de los buques (BAP).
2. Desarrollar un modelo de solución integral que permita combinar las diferentes metaheurísticas y heurísticas propuestas para la solución de los problemas de optimización presentes en Logistic-CPT.

1.6. Justificación

De acuerdo a Zoe Infante Jiménez [Infante 2010] son pocos los estudios que proveen información u ofrecen una respuesta satisfactoria al problema de realizar comparaciones internacionales en materia de eficiencia portuaria. Este tipo de investigaciones son comunes en las naciones que pertenecen a los continentes Europeo y Asiático. Sin embargo, en América ésta clase de estudios no se realizan con la misma frecuencia.

La medición de indicadores de la operación portuaria no sólo es una herramienta de la autoridad o el operador portuario, sino también es información útil para formular políticas y planes para el desarrollo del transporte en un país. Estas tareas y mediciones ya están en la agenda de prioridades de muchas autoridades.

Doerr y Sánchez comentan que la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (United Nations Conference on Trade and Development, UNCTAD por sus siglas en inglés) acentuó la necesidad de mejorar y medir la eficiencia portuaria concluyendo que muchos de los estudios disponibles sobre indicadores de productividad portuaria eran poco satisfactorios [Infante 2010]. IPM al igual que otras compañías nacionales dedicadas al transporte de contenedores hacen grandes inversiones en tecnología para estar acorde con los altos estándares internacionales, sin embargo la administración de sus operaciones dista mucho de estar automatizada, dificultando la ejecución de sus procedimientos y por lo tanto el desarrollo de planes de maniobra y la medición de su productividad.

Los programas y tecnologías utilizados para el control de una terminal portuaria son desarrollados por empresas extranjeras dedicadas al ramo, sus productos son de alta calidad pero tienen un alto costo en el mercado, al mismo tiempo que requieren equipos especializados para operar (Cámaras especializadas, lectores de código de contenedores, POAs, hardware con grandes capacidades de procesamiento de datos entre otros), lo que hace que la implantación de estos sistemas represente un costo muy elevado para la industria nacional. Estos sistemas requieren a su vez de actualizaciones y mantenimiento constante

por lo que mantenerlos puede suponer una gran inversión de capital en el mediano y largo plazo.

En este documento se presenta una arquitectura para dar solución a los problemas de logística de contenedores mediante heurísticas y modelos que puedan ser ajustados para obtener un mejor desempeño. El desarrollo de este tipo de tecnologías en la región es un beneficio económico para la industria nacional al desarrollar e implementar sistemas de bajo costo con una calidad igual, o superior, a la de sistemas similares. También es una aportación científica porque desarrolla, implementa e integra diversos modelos de programación heurística para dar solución a problemas reales que tienen muy poco estudio por parte de las instituciones nacionales.

1.7. Alcances y limitaciones

La logística de contenedores para una terminal portuaria involucra muchas áreas y tareas, cada una de las cuales representa en si misma un problema al menos NP-Duro (ver capítulo 5). Cada uno de estos procesos está delimitado por las restricciones recopiladas durante el análisis de procedimientos realizado en las instalaciones de IPM con el auxilio del personal responsable de llevar a cabo dichas tareas y aportaciones del personal de FORTIA.

El estudio realizado en la terminal marítima portuaria IPM reveló que las capacidades con que cuenta la terminal, así como sus múltiples variaciones con respecto a un Sistema de Transferencias Directas (Direct Transfer System, DTS por sus siglas en inglés) [Cordeau 2007], requieren automatizar las áreas correspondientes a las operaciones que afectan el tiempo requerido para la carga y descarga de los buques.

Los contenedores registrados en el sistema serán marcados como parte de la carga que llevará un buque, salvo que el personal pertinente determine que no debe formar parte de ésta lista por cualquier causa que pudiera ocurrir dentro de los procesos administrativos internos de la terminal. A su vez, se asume que la posición ocupada por un contenedor durante su tiempo de estancia en la terminal deberá coincidir con la información que se proporciona al sistema. Los cambios y modificaciones que se realicen durante el proceso de ejecución de las tareas requerirán la realización de otra ejecución del sistema para generar una nueva solución que incluya los cambios realizados.

Logistic-CPT proporcionará una solución factible que logre reducir los tiempos de estancia de un buque, otorgando una solución aceptable en términos de su tiempo de

completación y distribución de recursos para la carga de buques mediante grúas y el traslado de los contenedores desde patio a buque. Ésta solución generada podrá ser alterada o modificada para ajustarse a las políticas internas de la compañía.

1.8. Organización del documento

El presente documento está organizado de la siguiente manera:

En el Capítulo 2 se presenta una revisión de los fundamentos teóricos y problemas involucrados en el proceso de la logística de contenedores. Se describen formalmente los problemas abordados y las estrategias metaheurísticas aplicadas para resolver dichos problemas. Así mismo, se introducen los principales conceptos y características de los componentes que influyen en el proceso de optimización.

En el Capítulo 3 se describen los principales trabajos que conforman el estado del arte. Las comparativas entre diferentes heurísticas aplicadas a dar solución a cada uno de los procesos involucrados en la logística de contenedores del caso de estudio.

El Capítulo 4 describe de forma precisa los modelos de solución para los cinco problemas abordados en el modelo Logistic-CPT: CPP, CSSP, BAP, QCAP y QCSP.

En el Capítulo 5 se detalla la metodología propuesta y su aplicación para dar solución al modelo Logistic-CPT. Las principales etapas de la metodología de solución son: El esquema general de solución para el modelo planteado y los diversos algoritmos planteados para cada problema, la comunicación e interacción entre los diversos módulos, la generación de instancias y los parámetros que serán evaluados en las soluciones generadas.

En el Capítulo 6 se presenta la implementación realizada, y se incluyen los resultados experimentales de la aplicación de la metodología propuesta para Logistic-CPT. Obteniendo como producto final un conjunto de algoritmos que trabajan de forma conjunta para dar soluciones a cada problema involucrado. Los resultados muestran una mejora significativa en el desempeño con respecto a la operación manual. Para el caso de QCSP, se superan los mejores resultados reportados en la literatura.

En el Capítulo 7 se presentan las conclusiones de la investigación realizada, así como sugerencias para trabajos futuros.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Conceptos básicos de una terminal portuaria

Los conceptos de una terminal portuaria son muy amplios por lo que se realizó una revisión minuciosa para acotar la lista a sólo aquellos relevantes para este trabajo de tesis, sin afectar la comprensión de la problemática general. Particularmente, los conceptos presentados en la Tabla 2.1 fueron recabados durante el análisis de procesos realizado en las instalaciones de IPM. Estos conceptos forman parte del lenguaje diario del personal de una terminal portuaria.

2.1.1. Descripción de los procesos de la terminal portuaria IPM

Los puertos son espacios de intercambio marítimo-terrestre que tradicionalmente han contribuido al origen y constitución de la ciudad portuaria, así como también a su posterior desarrollo y configuración [Amil 2004]. Dentro de un puerto se pueden encontrar terminales marítimas o portuarias que son secciones específicas del puerto donde una o varias empresas pueden realizar actividades de carga y descarga de mercancías y demás operaciones que se requieren.

Las operaciones de carga y descarga de contenedores también llamado Logística de contenedores está regulado por estrictas normas internacionales que especifican de forma clara el cómo debe ser almacenada la mercancía en los contenedores y como éstos mismos necesitan ser apilados en su lugar correspondiente[ISO 6346].Las principales áreas de operación y flujo de contenedores de la terminal portuaria IPM se pueden apreciar de forma clara en la Figura 2.1.

IPM al igual que la mayoría de las terminales portuarias de Norteamérica y de Europa siguen un estándar llamado Sistema de Transferencia Directa (por sus siglas en inglés DTS,

Tabla 2.1: Conceptos básicos de una terminal portuaria.

Concepto	Definición
Contenedor	Recipiente metálico con dimensiones específicas de acuerdo a las normas ISO 6346, es utilizado para transportar diversas mercancías según sus características particulares.
Patio	Área dentro de la terminal portuaria utilizada para el apilado de contenedores
Grúa de muelle	Equipo específicamente diseñado para cargar o descargar un contenedor en un buque localizado en el muelle de la terminal portuaria.
Grúa de patio	Equipo diseñado para apilar o desapilar los contenedores en el patio de la terminal portuaria
Contenedor Consolidado	Todo aquel contenedor que tiene dentro de sí una carga.
Tara	Peso específico de un contenedor vacío.
Buque	Barco específicamente diseñado para transportar contenedores.
Terminal Portuaria	Área ubicada en un puerto en donde se realizan las operaciones de carga y descarga de contenedores de un buque. Incluye el almacenamiento de contenedores dentro de la terminal así como también el transporte de los mismos a diversos destinos mediante diferentes medios de transporte.
Logística de Contenedores	Todas aquellas operaciones relacionadas con el transporte, carga o descarga de contenedores.
Bahía	Espacio previamente delimitado que se utilizara para el acomodo de contenedores, ver Figura 2.2,2.3 y 2.4.

Direct Transfer System). En dicho estándar los vehículos que llevan los contenedores al patio, a las grúas y hacia las puertas también son capaces de mover los contenedores desde y hacia las posiciones que tienen éstos en el patio.

DTS requiere una superficie grande debido a los carriles exclusivos en el patio que son necesarios para que los vehículos puedan tener acceso a las posiciones del patio donde serán colocados los contenedores[Cordeau 2007].

2.1.2. Manejo de Contenedores

Los contenedores utilizados en IPM fueron construidos bajo el estándar [ISO 6346]. Los más utilizados en la industria, son los contenedores de 20 y 40 pies, además hay

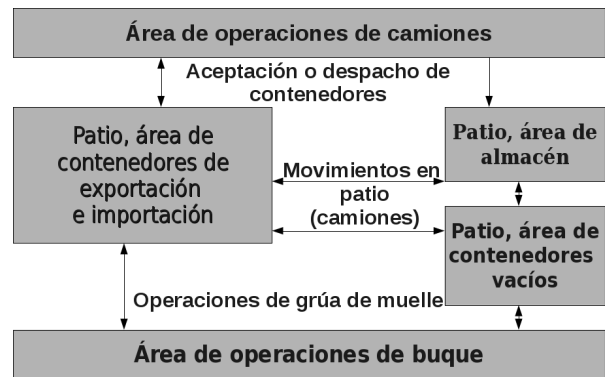


Figura 2.1: Área de operaciones de una terminal portuaria y su flujo de transporte.

contenedores refrigerantes o abiertos los cuales tienen una nomenclatura especial según sus características particulares, también estipuladas en las normas [ISO 6346].

En promedio en IPM se manejan alrededor de 150,000 contenedores por año en un total de 420 buques. El 60 % de los contenedores que ingresan a la terminal son ubicados en la sección de exportación vía terrestre a través de trenes o camiones; el 40 % restante es consolidado dentro de la terminal y posteriormente ubicado en su sección correspondiente.

2.1.2.1. Acomodo de contenedores en patio

La distribución de los contenedores en la terminal es una parte primordial del problema. Una mala distribución de los contenedores hace que se realicen más movimientos y que las grúas estén más tiempo inactivas [Rebollo 2002].

Los contenedores son acomodados eligiendo la bahía adecuada para cada contenedor, y esto se logra tomando en cuenta los siguientes puntos: se deberá respetar toda la bahía que incluya contenedores del mismo tamaño y preferentemente del mismo tipo. IPM se divide en secciones también llamadas zonas, las cuales tienen diversos propósitos de acuerdo a su uso.

La forma de reducir los movimientos es incrementar la densidad de apilamiento (Cantidad de contenedores colocados uno arriba de otro). De esta manera, todos los contenedores se encuentran en zonas próximas al buque. Se debe considerar que los contenedores tienen un ingreso aleatorio y aun contando con una lista detallada de los contenedores que llegarán o se espera que lleguen a la terminal, éstos no siempre llegarán en un orden o secuencia determinada o incluso pudieran nunca llegar. En IPM los contenedores se agrupan en diversas zonas:

- Zona de contenedores vacíos
- Zona de contenedores de exportación
- Zona de contenedores retenidos o en revisión
- Zona de contenedores de importación

El área de la terminal donde son ubicados los contenedores se constituye de seis filas y un número N de bahías como se aprecia en la Figura 2.2, donde las bahías pares representan espacios para contenedores de 20 pies y los impares para contenedores de 40 pies. Se cuenta con una separación de 50 centímetros entre cada bahía y 30 centímetros de separación entre cada fila.

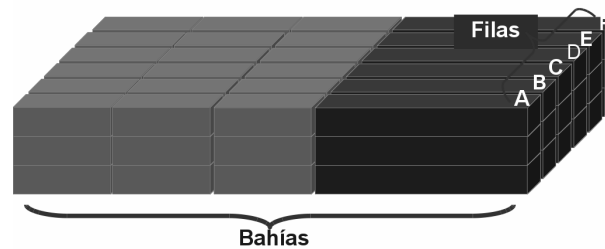


Figura 2.2: Vista de una sección de patio.

El peso de los contenedores se clasifica en:

- Ligeros: De 0 a 8 toneladas
- Medianos : De 8 a 15 toneladas
- Pesados: De 15 a 20 toneladas
- Súper Pesados: De 20 a 32 toneladas

El peso de los contenedores influye en el acomodo, se deben agrupar iniciando en la bahía “A” con los de menor peso hasta la “F” los mas pesados. No existen restricciones en cuanto al límite del peso que puede colocarse sobre un contenedor sin embargo solamente pueden crearse columnas de no más de 3 a 5 contenedores de acuerdo al tipo de grúa utilizada.

Las bahías tienen una altura máxima de 3 a 5 contenedores apilados uno encima de otro, que está restringida por la capacidad de las grúas utilizadas para el apilamiento.

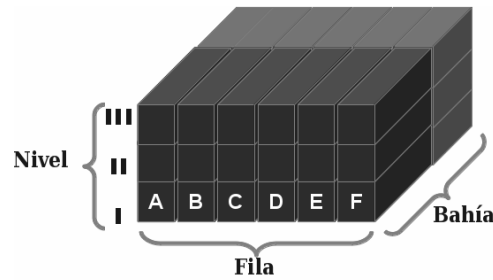


Figura 2.3: Vista de una sección de patio.

En la Figura 2.3 se ilustra una bahía con 3 niveles de apilamiento donde los niveles son indicados por número romano y las celdas por números ordinales.

Para desapilar los contenedores, la grúa se debe ubicar a un costado de la zona donde se desean desapilar los contenedores, comenzando siempre en la fila A, tal como se ilustra en la Figura 2.4.

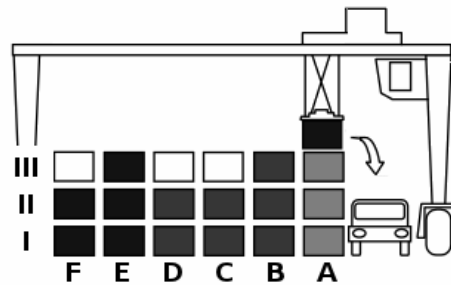


Figura 2.4: Vista de una sección de patio.

Realizar un movimiento de desapilado requiere un tiempo aproximado de 3 minutos por contenedor desde su ubicación actual, hasta el realizar la carga en el camión de carga a utilizar. El tiempo para apilar un contenedor no forma parte del modelo debido a la naturaleza aleatoria en que estos arriban a la terminal. Los camiones de carga para el transporte de contenedores dentro de la terminal, cuentan con ciertas mejoras, las cuales simplifican el tiempo de carga y descarga de los contenedores.

2.1.2.2. Área de contenedores vacíos

En esta zona los contenedores son recibidos a través de un envío vía buque, tren o camión y son colocados en las secciones U, S, R y Q del diagrama de la terminal (ver Figura 2.5).

Son utilizados para ser enviados a otros puertos o destinos diversos vía buque, tren o

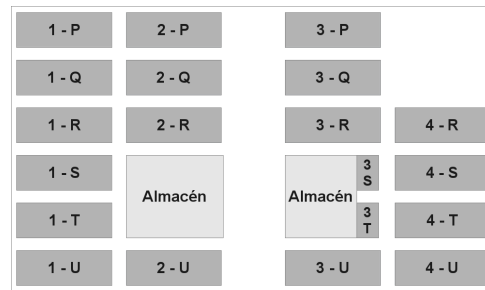


Figura 2.5: Área para contenedores vacíos.

camión según corresponda, también para guardar mercancías diversas de acuerdo a sus características particulares.

Las mercancías son cargadas (“consolidada” según terminología de la terminal) en los almacenes correspondientes y el contenedor pasa a una zona específica según su destino; si corresponde a un envío vía buque se localizará en la zona de exportación, o si su salida es vía camión pasara a la zona de importación. Los bloques vacíos o bloques de transición son acomodados en las zonas de la terminal de acuerdo a varios principios de ordenamiento como son la línea naviera a la que pertenecen, el tipo de contenedor, su tamaño y la salida que tendrán estos.

2.1.2.3. Área de contenedores de exportación

En esta zona se almacenan los contenedores recibidos vía buque, tren, camión o consolidados dentro de la terminal. Cuando estos tienen un destino vía buque se ubican en la sección de exportación de la terminal, marcada con las letras W, X y Y (ver Figura 2.6).

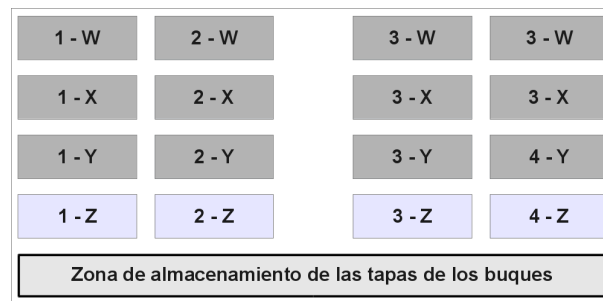


Figura 2.6: Área de contenedores de exportación

Éstas requieren de una configuración especial de llenado, debido a que están íntimamente relacionadas con la operación de carga del buque. Los bloques de exportación siguen un criterio de apilamiento dentro de la zona de acuerdo a su destino, tamaño del

contenedor y su peso. Estas zonas llevan una nomenclatura especial que indica el tipo de contenedor que agrupan. Los criterios utilizados para acomodar los contenedores en la zona de exportación son: la ruta del buque, el viaje a realizar, el destino del contenedor, el peso específico del contenedor con su carga, y el tamaño del contenedor.

2.1.2.4. Área de contenedores retenidos

Los contenedores retenidos son contenedores consolidados que han sido requeridos por las autoridades correspondientes para ser revisados. Estos son llevados a la sección K, M y O (ver Figura 2.7) de la terminal, marcada como área de revisión, o en casos extremos fuera de la terminal portuaria donde ya no se le puede dar seguimiento.



Figura 2.7: Área de revisión de contenedores

2.1.2.5. Zona de contenedores de importación

Estos son contenedores consolidados que han sido descargados del buque y son llevados a una sección temporal de la terminal donde estarán en espera de ser desconsolidados dentro de la terminal portuaria o enviados a sus destinos correspondientes. Esta zona no requiere una optimización debido a que se desconoce el orden que los clientes pasaran a recoger sus contenedores.

2.1.2.6. Manejo de los contenedores en buque

Los buques al igual que el patio están divididos en bahía, fila y nivel. La bahía corresponde a una sección con espacio suficiente para ser ocupado por un contenedor de 20 pies, en este caso se pueden colocar dos contenedores de 20 y en la parte superior uno de 40 sin que se pueda hacer lo inverso.

La distribución de los espacios en el buque se detalla en la Figura 2.8. Dicha distribución constará de dos filas o más de acuerdo al tipo de buque y se indican en números comenzando desde el uno para espacios de 20 pies y de forma par cuando se desea agrupar contenedores de 40 pies, se realizará de igual forma para las bahías. Las bahías

que contiene el buque, se numeran en forma impar para las que agrupan contenedores de 20 pies y de forma par para las que agrupan contenedores de 40 pies.

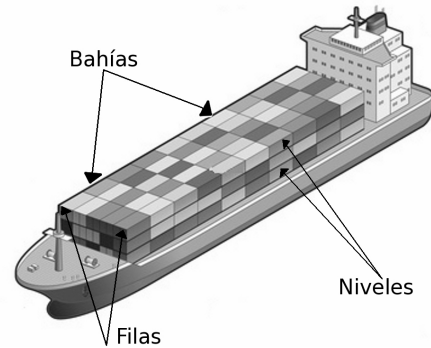


Figura 2.8: Vista del buque desde su parte superior

El número de contenedores apilados a partir del primero indica el nivel que ocupa cada contenedor como se ilustra en la Figura 2.9.

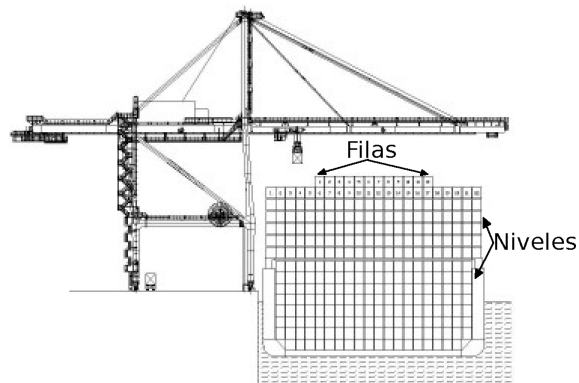


Figura 2.9: Vista trasera del buque

La carga deberá ser distribuida de forma uniforme respetando la estabilidad del buque cuyo límite varía conforme las especificaciones entregadas por el personal del buque. Normalmente esta configuración la entrega agencia naviera sin embargo no siempre ocurre.

Las configuraciones de carga respetarán las opciones de acomodo de los contenedores y el peso máximo que puede ser colocado en un nivel, se recomienda siempre colocar los contenedores súper pesados y pesados en la parte centro baja del buque. La carga en el buque debe ser descargada desde el punto más cercano a la grúa hasta el más lejano, realizando el proceso inverso para su carga.

2.2. Problemas de la logística de contenedores

La logística de contenedores abarca una gran variedad de problemas que han sido modelados por diversos autores en la literatura. Una parte importante se originan durante el paso de los contenedores por la terminal. En la Figura 2.10 se detalla el flujo de contenedores dentro de las áreas que conforman una terminal portuaria.

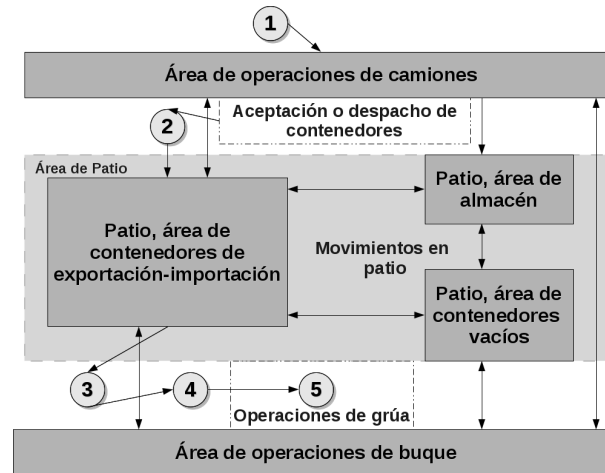


Figura 2.10: Análisis de problemas en el flujo de contenedores en una terminal portuaria

El modelo de solución para la Logística para una Terminal Portuaria de Contenedores propuesto en este proyecto de investigación en Logistic-CPT (Logistic for a Container Port Terminal) aborda una parte importante del proceso de logística de contenedores de la terminal portuaria IPM. El modelo aborda cinco problemas de optimización relacionados:

- Acomodo de contenedores en patio
- Acomodo de contenedores en buque.
- Atraque de buques en el muelle.
- Asignación de grúas de muelle a los buques.
- Planeación de operaciones de grúa.

El flujo de contenedores que ocurre en una terminal portuaria (ver Figura 2.10), inicia desde el momento que un contenedor arriba a ésta. El siguiente paso consiste en tomar los datos del contenedor y realizar una revisión del mismo en base a la información que la agencia naviera proporcione a IPM para identificar el destino que tendrá este contenedor.

Posteriormente se determina en que parte del patio de la terminal será ubicado de forma temporal el contenedor en espera de su siguiente destino.

Los contenedores no solo arriban por el área de operaciones de camiones. Estos pueden ser consolidados en almacén con mercancías diversas e introducidos en el flujo de contenedores tal como se muestra en la Figura 2.10 que representa un esquema de flujo general de los contenedores dentro de la terminal portuaria. Este flujo descrito genera diversos problemas descritos en la Tabla 2.2. Los problemas abordados del flujo de contenedores en la literatura son denominados de acuerdo como se muestra en la Tabla 2.3.; Logistic CPT da solución a los problemas CPP, CSSP, BAP, QCAP y QCSP que reciben como entradas la información que IPM le proporcionará al modelo o en su defecto la solución generada por su predecesor tal como se ilustra en la Figura 2.11.

Tabla 2.2: Descripción del flujo de contenedores en una terminal.

Problema	Descripción	Ubicación
1	Arribo de los contenedores a la terminal portuaria.	Área de operaciones de camiones
2	Ubicación de los contenedores en patio, de acuerdo a su zona destino proporcionada por personal de IPM	Zona de patios de la terminal.
3	Planeación de los movimientos de contenedores de patio a buque y su ubicación en buque correspondiente.	Zona patios de la terminal.
4	Asignación de recursos para la atención de los buques. Grúas de muelle y ubicación de los buques	Área de Operaciones de Buque
5	Planeación de las secuencias de carga de las grúas	Área de Operaciones de Buque

2.2.1. Problema de posicionamiento de contenedores en patio

Para dar solución al problema de posicionamiento de contenedores (Container Positioning Problem, CPP por sus siglas en inglés) el patio de la terminal se divide en diversas secciones para almacenar de forma temporal los contenedores según el estado en el que se encuentren en la terminal. Estos estados de los contenedores pueden ser de exportación, importación o revisión.

Un servicio es definido como un ingreso o salida dependiendo del flujo de los contenedores. Cuando un contenedor llega a la terminal en un servicio, este servicio es un ingreso y cuando es enviado al buque se considera una salida.

Tabla 2.3: Problemas generados por el flujo de contenedores y sus restricciones

Problema	Descripción	Objetivo	Restricciones
CPP	Determinar la posición de los contenedores en patio.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Distribuir los contenedores ▪ Minimizar los espacios asignados 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipo de contenedor ▪ Carga del contenedor ▪ Destino del contenedor
CSSP	Distribución de los contenedores en el buque.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Generar la carga del buque correspondiente 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Destino del contenedor ▪ Tamaño del contenedor ▪ Peso del contenedor ▪ Características físicas del buque
BAP	Asignación de posiciones de atraque a los buques.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Minimizar el tiempo de estancia de los buques 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cantidad de muelles disponibles en el puerto
QCAP	Asignación de grúas de muelle a cada buque.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Minimizar la cantidad de recursos asignados a cada buque 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cantidad de grúas de muelle disponibles
QCSP	Planeación de movimientos de grúas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Minimizar los movimientos de las grúas de muelle 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Orden de acomodo de los contenedores ▪ Distancia entre las grúas

El servicio de ubicación tiene un impacto en el número de operaciones realizadas en patio. Los administradores de la terminal intentan minimizar las operaciones de manejo de contenedores que ocurren al transferir un contenedor de una zona a otra, también llamado housekeeping, que ocurre cuando la zona de contenedores de exportación es diferente a la de contenedores de importación [Cordeau 2007].

El objetivo principal del CPP consiste en minimizar el espacio utilizado en la terminal. Diversos autores difieren sobre la prioridad de las áreas que deben ser optimizadas, sin embargo, esto solo se da cuando las operaciones de importación o exportación de la terminal no representan una problemática al ser servicios que no ocurren con la suficiente frecuencia para poder afectar dicha área.

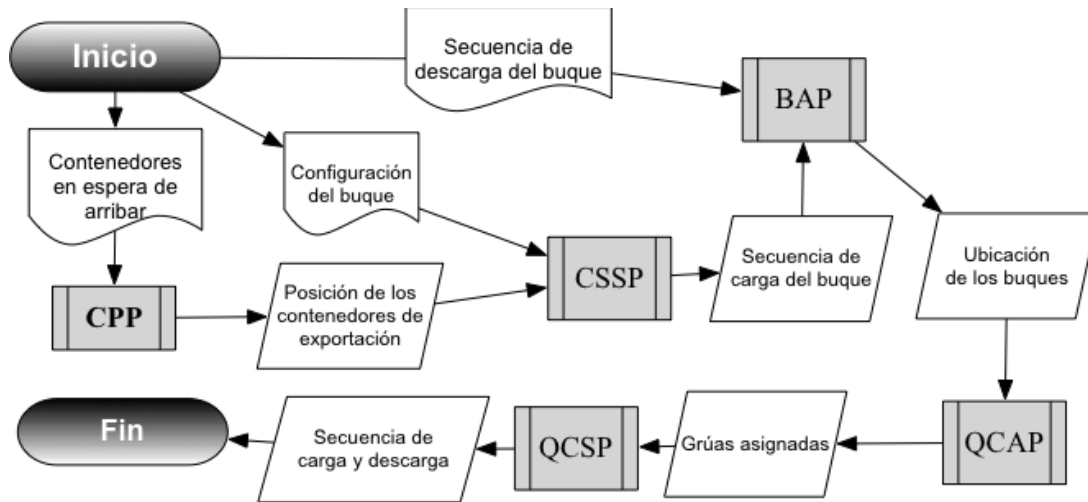


Figura 2.11: Problemas de optimización Logistic CPT

2.2.2. Definición formal de CPP

Dado un conjunto de contenedores C a ser ubicados en una n cantidad de bahías disponibles. Se busca minimizar el espacio requerido para almacenar dicho conjunto de contenedores. El conjunto C esta formado por:

$$C = \{c^1, c^2, c^3, \dots, c^{|C|}\} \quad (2.1)$$

Donde cada uno de los c^i del conjunto representa un grupo de contenedores con características similares. Las bahías son un conjunto de espacios limitado donde deberán acomodarse cada uno de los contenedores. El conjunto de bahías esta definido por:

$$B = \{b^1, b^2, b^3, \dots, b^{|B|}\} \quad (2.2)$$

Cada conjunto c^i debe ser ubicado en su conjunto b^i correspondiente. Mohamamad Bazzazi [Bazzazi 2009] presenta un modelo del problema CPP con las siguientes características.

2.2.2.1. Conceptos utilizados para el planteamiento del CPP

- Contenedor de Importación (IB, Inbound Container): Es aquel contenedor que se descarga del buque, es almacenado en espera de ser enviado al cliente.
- Contenedor de Exportación (OB, Outbound Container): Contenedor que llega a la

terminal y es almacenado en un espacio temporal, mientras espera ser enviado al buque.

- Grúa de Muelle (QC, Quay Crane): Equipo utilizado para descargar IBs y enviarlos a patio, también carga los OBs en el buque
- Camión Interno (IT, Internal Truck): Transporta los contenedores entre las QCs y las secciones de almacenamiento.
- Camión Externo (XT, External Truck): Ingresa los OBs de los clientes en los bloques de almacenamiento, también recoge los IBs del área de importación y los envía a los clientes.
- Grúas de almacenamiento (SSC ó RTGG, Storage Space Crane): Maneja los contenedores en los bloques de almacenamiento depositándolos en los IT o en los bloques según corresponda.
- Carga de trabajo del buque (Workload of Vessel): Número de IB y OB que deben ser cargados y descargados del buque.

Conjuntos de contenedores utilizados:

- C1: IB antes de ser descargados y ubicados en patio
- C2: IB en el área de almacenamiento en espera de ser llevados a los clientes
- C3: OB en espera que arriben a la terminal y sean almacenados
- C4: OB en el área de almacenamiento en espera de ser cargados a buque.

Variables de entrada

B	Bloques para almacenamiento o bahías
T	Número total de periodos
R	Tipos de contenedores
c^i	Capacidad de almacenamiento de cada bloque $1 \leq l \leq B$
D_{tkr}	Número esperado de C1 del tipo r , descargados de buque en un periodo t y son recogidos por el cliente en un periodo $t + k$, $1 \leq t \leq T$; $0 \leq k \leq T - t$

B_{itr}	Número esperado de $C1$ del tipo r descargados del buque en un periodo t asignados al bloque i , que no se conoce cuando pasaran por ellos o su tiempo de estancia es mayor que el planeado $1 \leq t \leq T$; $1 \leq i \leq B$
P_{itr}^0	El número inicial esperado de $C2$ de tipo r que llega a la terminal en un periodo t a ser cargado en el buque en un periodo de tiempo $t + k$, $1 \leq t \leq T$; $0 \leq k \leq T - t$
V_{ir}	Carga inicial de contenedores en el bloque i del tipo r . Al inicio del periodo $1 \leq i \leq B$
S_{ir}	$\begin{cases} 1 & \text{si el tipo de contenedor } r \text{ puede ser ubicado en el bloque } i \\ 0 & \text{sino} \end{cases}$
η	Densidad de almacenamiento para cada bloque
M	Un entero positivo grande arbitrario

Variables de decisión

D_{itkr}	Número de contenedores $C1$ del tipo r con toda su información guardados en i en un periodo de tiempo t recogidos en $t + k$
D_{itr}	Número total de contenedores $C1$ del tipo r almacenados en el bloque i descargados en un periodo t ; $1 \leq t \leq T$; $1 \leq i \leq B$
P_{itr}	Número total de contenedores $C2$ del tipo r almacenados en el bloque i que son recogidos por el cliente en un periodo t ; $1 \leq t \leq T$; $1 \leq i \leq B$
V_{itr}	Número de contenedores del tipo r ($C1$ y $C2$) ubicados en el bloque i al final del periodo t , $1 \leq t \leq T$; $1 \leq i \leq B$

2.2.2.2. Función objetivo del CPP

Utilizar la menor cantidad de bahías disponibles. En una terminal portuaria 85 % de la carga de trabajo está relacionada con los contenedores del tipo $C1$ y $C2$ [Bazzazi 2009].

$$\begin{aligned} \text{mín } z = & \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R (w1[\text{máx}_{1 \leq i \leq B} \{D_{itr}\} - \text{mín}_{1 \leq i \leq B} \{D_{itr}\}] \\ & + w2[\text{máx}_{1 \leq i \leq B} \{D_{itr} + P_{itr}\} - \text{mín}_{1 \leq i \leq B} \{D_{itr} + P_{itr}\}]) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Donde w_1 y w_2 son pesos ajustados de acuerdo a la importancia de la carga y descarga. El primer término balancea los contenedores $C1$ y el segundo balancea $C1$ y $C2$ simultáneamente

2.2.2.3. Modelo matemático CPP

La función objetivo del CPP está restringida por el siguiente conjunto de restricciones.

2.4: Asegura que el número total esperado de $C1$ tipo r que esperan ser almacenados, \bar{D}_{tkr} es la suma de los contenedores asignados a todos los bloques.

$$\sum_{b=1}^B D_{itkr} = \bar{D}_{tkr} \quad r = 1, 2, \dots, R; \quad k = 1, 2, \dots, T - t; \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2.4)$$

$$D_{itr} = \beta_{itr} + \sum_{k=0}^{T-t} D_{itkr} \quad r = 1, 2, \dots, R; \quad i = 1, 2, \dots, B; \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2.5)$$

Asegura el número total de contenedores $C1$ tipo r asignados al bloque i en un periodo de tiempo t

Restricciones en contenedores $C2$

$$P_{itr} = \sum_{k=0}^{t-1} D_{i(t-k)kr} + P_{itr}^0 \quad r = 1, 2, \dots, R; \quad i = 1, 2, \dots, B; \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2.6)$$

El número de contenedores $C2$ tipo r manejados en el bloque i durante el periodo de tiempo t

P_{itr}^0 consiste en dos partes:

- Contenedores transferidos del $C2$ correspondiente que llegaron en el horizonte de planeación
- Contenedores $C2$ inicialmente almacenados en el bloque i a ser cargados al buque en un periodo de tiempo t en el horizonte de planeación actual.

Restricciones en la densidad de los bloques.

$$V_{itr} = V_{i(t-1)} \quad r = 1, 2, \dots, R; \quad i = 1, 2, \dots, B \quad t = 1, 2, \dots, B \quad (2.7)$$

Actualización del inventario V_{itr} de un periodo a otro

$$V_{itr} \leq \eta C_i \quad r = 1, 2, \dots, R \quad i = 1, 2, \dots, B \quad t = 1, 2, \dots, B \quad (2.8)$$

Asegura que el inventario de cada bloque en cada periodo no excederá la capacidad del bloque.

Restricciones en los tipos de contenedores.

$$\bar{D}_{itr} \leq MxS_{ir} \quad r = 1, 2, \dots, R; \quad i = 1, 2, \dots, B; \quad t = 1, 2, \dots, B \quad (2.9)$$

Todas las variables de decisión deberán ser enteros positivos

2.2.3. Definición formal de CSSP

En el CSSP, dado un conjunto C de n contenedores con diferentes tipos de carga en un buque y un conjunto S de m lugares disponibles dentro del buque, se tiene que determinar una asignación de los contenedores a los lugares en buque que satisfaga las restricciones estructurales y funcionales dadas, buscando minimizar el tiempo de carga total.

Las variables utilizadas en los modelos difieren de las anteriormente expuestas debido al planteamiento utilizado en la literatura. La función objetivo de este es expresada en términos del tiempo mínimo requerido, para el almacenamiento de los contenedores que se requieren cargar a un buque dado

Como ya se menciona, cada contenedor debe ser situado en una ubicación del buque. Para realizar esta tarea se requiere mayor precisión en la descripción de localidades. La l -ésima ubicación es dirigida por los índices i, j, k , que representan respectivamente: la bahía (i), que le da su posición relacionada con la sección transversal del buque (contadas a partir de proa a popa), la fila (j), que le su posición relacionada a la sección horizontal de la bahía correspondiente (contadas desde el centro hacia afuera), y el nivel (k) que le da su posición relacionada con la sección vertical de la bahía correspondiente (contados a partir de abajo hacia arriba). Se denota por I, J y K , respectivamente, el conjunto de bahías, filas y niveles del buque, y por b, r y s su cardinalidad correspondiente

Tamaño de los contenedores. Generalmente, el conjunto de los C contenedores se considera como la unión de dos subconjuntos, T (Twenty) y F (Forty), que consisten, respectivamente, de contenedores de 20 y de 40 pies, de tal manera que $T \cap F = \emptyset$ y

$T \cup F = C$. Los contenedores de 40 pies (denotado por 40') requieren de dos localidades contiguas de 20 pies (denotado por 20').

Tipo de contenedores. Contenedores de diferentes tipos son estibados en portacontenedores, tales como estándar, frigoríficos y peligrosos. La localización de los contenedores refrigerados se define por el coordinador del buque (quien tiene una visión global del viaje), por lo que se conoce su posición exacta. Esto es generalmente cerca de los puntos de alimentación, para mantener la temperatura requerida durante el transporte. Además, los contenedores peligrosos son asignados por la oficina de capitanía de puerto, que autoriza las operaciones de carga. En particular, los contenedores peligrosos no pueden ser estibados en la cubierta superior ni en lugares que no cubran las condiciones y características necesarias que permitan garantizar su transporte de forma segura. Se tiene en cuenta que, para la definición del plan de estiba se consideran únicamente contenedores que tienen tres dimensiones exteriores conforme a los estándares ISO de 20 y 40 pies de largo, ya sea de 8 pies 6 pulgadas o de 9 pies 6 pulgadas de alto y 8 pies de ancho.

Peso de los contenedores. El peso estándar de un contenedor vacío varía de 2 a 3.5 toneladas, mientras que el peso máximo de un contenedor lleno puede ser guardado en portacontenedores con rangos de 20 a 32 toneladas y de 30 a 48 toneladas para contenedores de 20' y 40', respectivamente. Las restricciones de peso limitan el apilamiento de los contenedores a un valor menor que el del valor de tolerancia dado. En particular, el peso de una pila de 3 contenedores de 20' y 40' no puede ser mayor que un valor establecido (MT y MF, respectivamente). Por otra parte, el peso de un contenedor situado en un nivel no puede ser más grande que el peso de un contenedor localizado en un nivel más bajo, la misma fila y la misma bahía .

Destino de los contenedores. Una buena regla general de estiba sugiere cargar primero (en niveles bajos) los contenedores que tienen como destino la parada final del buque y cargar a lo último los contenedores que tienen que ser descargados primero.

Distribución de los contenedores. Estas restricciones, también denotadas como restricciones de estabilidad, están relacionadas con una distribución del peso adecuado en el buque. En particular, se tiene que comprobar los diferentes tipos de equilibrio:

1. El equilibrio horizontal. El peso en el lado derecho del buque, incluyendo las filas impares de la bodega y de la cubierta superior, debe de ser igual (con tolerancia) al peso del lado izquierdo del buque. Se denota por L y R , respectivamente, el conjunto de filas que pertenecen a la izquierda/derecha del buque

2. El equilibrio en cruz. El peso en la popa, el cual debe de ser igual (dentro de una tolerancia dada) al peso del arco. Se denotan como A y P , respectivamente, los conjuntos de las bahías anterior posterior del buque.
3. El equilibrio vertical. El peso de cada nivel debe de ser mayor o igual que el peso en nivel inmediatamente sobre él.

2.2.4. Definición formal de BAP

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 2.12 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. El problema de atraques de buques se define de la siguiente forma.

Dado un conjunto V de buques, encontrar la secuencia óptima de atraque que permita minimizar el tiempo requerido para atender las operaciones de carga y descarga de cada buque V^i .

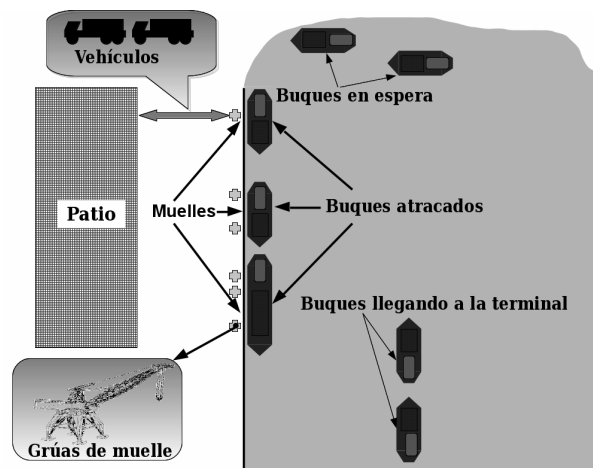


Figura 2.12: Diagrama de estados del buque en la terminal

En la literatura especializada existen diversos modelos matemáticos que dan solución al problema del BAP. En este documento de tesis no se contempla un modelo en particular

debido a que las soluciones generadas por los algoritmos metaheurísticos propuestos serán evaluadas utilizando los metaheurísticos para evaluar los problemas de QCAP y QCSP.

2.2.5. Definición formal de QCAP

Este problema consiste en otorgar a un buque la cantidad necesaria de grúas de muelle para realizar todas sus operaciones de carga y descarga en un tiempo mínimo. La complejidad de este problema radica en la cantidad de buques que deben ser atendidos de forma simultánea en la terminal. El QCAP recibe como entrada la cantidad de buques a ser atendidos, el total de contenedores que deberán cargarse y descargarse en un buque y la posición del muelle donde estará ubicado cada uno de los muelles.

El QCAP se define como, dado un conjunto de grúas QC encontrar la partición mínima requerida para realizar de forma óptima las tareas de carga y descarga de contenedores de un conjunto de buques dado. La complejidad de este problema está estrechamente relacionada con el problema de QCSP al representar un dato indispensable para resolver las instancias de éste, por tal motivo no se plantea un modelo en particular para resolver el QCAP y su solución será evaluada en base al tiempo requerido por las grúas asignadas al buque para realizar todas las tareas que fueron asignadas.

2.2.6. Definición formal de QCSP

El problema de programación de grúas de muelle recibe las tareas generadas y determinará la secuencia de movimientos con la cantidad de grúas máximas disponibles que le fueron asignadas. Los bloques generados por CSSP son divididos en bahías y cada una de las bahías del buque con su respectiva carga de trabajo ordenada representa una tarea para el problema de QCSP.

El objetivo principal de este problema es la obtención de una secuencia de carga y descarga de contenedores en un buque mediante grúas de muelle. La meta del QCSP es el determinar la secuencia óptima de operaciones que las grúas de muelle realizaran y minimizar el tiempo total de carga y descarga del buque [Kim & Park 2004].

QCSP recibe como parámetros de entrada el estado inicial del buque con sus correspondientes contenedores a descargar y el estado de salida del buque, con los contenedores que serán cargados para ser enviados a otros puertos. Cada uno de los anteriores parámetros incluye la ubicación específica de cada contenedor. Y a modo de simplificación, se dará un tiempo promedio de carga y descarga para todos los contenedores.

Cada tarea representa una bahía del buque y deberá ser asignada a una grúa en específico la cual tendrá un tiempo promedio para realizar la tarea . Kap Hwan Kim y Young-Man Park publicaron en 2004 un modelo que consiste de evaluar la secuencia de tareas a realizar en m buques con un número k de grúas, como se ilustra en la Figura 2.13.

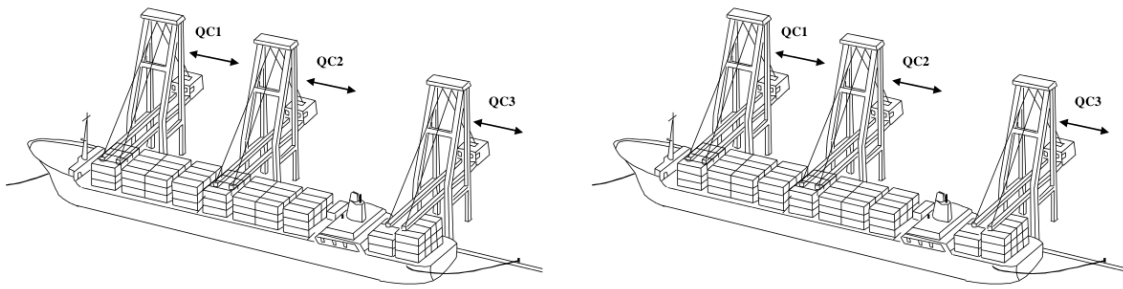


Figura 2.13: Tareas asignadas a k grúas en n buques.

Una secuencia correcta de tareas permite que las grúas trabajen en una parte del buque de forma simultánea realizando diversas tareas sin que las grúas tengan que esperar que otra termine una tarea para poder realizar la siguiente. Esto representa un problema de sincronización o agenda de m máquinas en paralelo [Kim & Park 2004].

2.2.6.1. Modelo matemático de QCSP propuesto por Kim & Park.

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_k^T	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_{0j}^k y t_{jT}^k representan el tiempo de viaje desde la posición inicial l_k^0 de la QC k hasta la posición l_j de la tarea j , y de la ubicación l_j al destino final l_k^T de la QC k .
M	Constante suficientemente grande
α_1	Peso del tiempo máximo de terminación.
α_2	Peso del tiempo total de terminación.

Conjunto de índices

Ω	Conjunto de todas las tareas.
Ψ	Conjunto de pares de tareas que no se pueden realizar al mismo tiempo.
Φ	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.

Función objetivo del QCSP

$$\text{mín } \alpha_1 * W + \alpha_2 \sum_{k=1}^K Y_k \quad \forall \alpha_1 > \alpha_2 \quad (2.10)$$

La función multiobjetivo 2.10 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 14 restricciones:

Evaluación de la carga de trabajo.

$$Y_k \leq W \quad \forall k = 1, 2, \dots, |K| \quad (2.11)$$

Esta restricción selecciona la primera tarea a ser realizada

$$\sum_{j \in \Omega} X_{0j}^k = 1 \quad \forall k = 1, 2, \dots, |K| \quad (2.12)$$

Selecciona la última tarea a realizarse.

$$\sum_{i \in \Omega} X_{it}^k = 1 \quad \forall k = 1, 2, \dots, |K| \quad (2.13)$$

Verifica que cada tarea se realice únicamente por una sola grúa.

$$\sum_k \sum_{i \in \Omega} X_{ij}^k = 1 \quad \forall j \in \Omega \quad (2.14)$$

Esta restricción representa un balance en el flujo de las restricciones, garantizando que cada tarea se lleva en una secuencia bien definida al no ser violentada ninguna restricción.

$$\sum_j X_{ij}^k - \sum_j X_{ji}^k = 0 \quad \forall i \in \Omega; \quad k = 1, 2, \dots, |K| \quad (2.15)$$

Determina el tiempo de terminación para cada tarea.

$$D_i + t_i, j + p_j - D_j \leq M(1 - X_{ij}^k) \quad \forall i, j \in \Omega; \quad k = 1, 2, \dots, |K| \quad (2.16)$$

Denota que i debe realizarse antes que j , si estas pertenecen al conjunto Φ

$$D_i + p_j \leq D_j \quad \forall (i, j) \in \Phi \quad (2.17)$$

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

$$D_i - D_j + p_j \leq M(1 - Z_{ij}) \quad \forall i, j \in \Omega \quad (2.18)$$

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

$$Z_{ij} + Z_{ji} = 1 \quad \forall (i, j) \in \Psi \quad (2.19)$$

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

$$\sum_{v=1}^k \sum_{u \in \Omega} X_{uj}^u - \sum_{v=1}^k \sum_{u \in \Omega} X_{ui}^u \leq M(Z_{ij} + Z_{ji}) \quad \forall i, j \in \Omega; \quad l_i \leq l_j; \quad k = 1, 2, \dots, |K| \quad (2.20)$$

Tiempo de terminación de cada QC

$$D_j + t_{jT}^k - Y_k \leq M(1 - X_j^k T) \quad \forall j \in \Omega; \quad k = 1, 2, \dots, |K| \quad (2.21)$$

Restringe el tiempo de inicio de las operaciones de cada QC

$$r_k - D_j + t_{0j}^k + p_j \leq M(1 - X_{0j}^k) \quad \forall k = 1, 2, \dots, |K| \quad (2.22)$$

Define los valores que tomarán las variables de decisión X y Z :

$$X_{ij}^k, Z_{ij} = 0 \text{ ó } 1 \quad \forall i, j \in \Omega; k = 1, 2, \dots, |K| \quad (2.23)$$

Define los valores de las variables Y_k y D_i como enteros mayores o iguales a cero:

$$Y_k, D_i \geq 0 \quad \forall i, j \in \Omega; k = 1, 2, \dots, |K| \quad (2.24)$$

Capítulo 3

Estado del Arte

En este capítulo se detalla una revisión de trabajos relacionados con la logística de contenedores. Los problemas involucrados en el tema han sido abordados de diversas formas, generando así una gran cantidad de nomenclaturas y diversos modelos de solución. Es común encontrar un problema con diversos nombres y formas en que es abordado, debido a las diferencias en la forma como se realizan las operaciones en las distintas terminales portuarias del orbe. Durante el presente capítulo se utilizará la nomenclatura mas acorde con las características particulares del caso de estudio.

3.1. Trabajos relacionados

Existen muchos autores que proponen diversos modelos y soluciones para los problemas relacionados con éste trabajo de investigación. En la Tabla 3.1 se presentan las soluciones propuestas para los problemas abordados durante el presente documento.

Louise K Sibbesen [L.K Sibbesen 2008] aborda el problema de posicionamiento de contenedores (CPP) y lo define como la determinación de secuencias óptimas de las posiciones y movimientos de los contenedores en una sola almacenamiento de bloques de un patio de la terminal. Su objetivo principal es la aplicación de métodos para la optimización de CPP mediante la construcción de las formulaciones de programación matemática del problema. En su tesis propone diversos modelos de programación lineal para dar solución a dicho problema.

Estos modelos proporcionan una base para el análisis del CPP, lo que demuestra su complejidad. Investigá los enfoques basados en soluciones exactas. Resuelve los modelos mediante software de optimización estándar y haciendo uso de las perspectivas de solución alternativa. Posteriormente presenta un algoritmo heurístico de solución para CPP sobre

Tabla 3.1: Soluciones propuestas en el estado del arte

Autor	Modelo	Año	Algoritmo	Problemas abordados				
				CPP	CSSP	BAP	QCAP	QCSP
L.K Sibbesen	SI	2008	Genético <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cruza aritmética ▪ Mutación de piedra paso a paso ▪ Heurística propia para la selección de padres ▪ Heurística propia basada en búsqueda, aceptación o rechazo de soluciones 	X				
C. Carrascosa, M. Rebollo	NO	2000	Sistema multiagente	X	X	X	X	X
Kap Hwan Kim	SI	2010	Framework para las operaciones de patio	X				
Daniela Ambrosino	SI	2006	Heurística propia basada en tres etapas.		X			
Alberto Delgado	SI	2010	Algoritmo de ramificación, búsqueda local Branch and Bound		X			
Yongpei Guan	SI	2002	Heurística basada en el límite inferior teórico			X		X
Ilaria Vacca	SI	2007	Busqueda tabú anidada			X	X	
Kap Hwan Kim	SI	2004	Búsqueda local GRASP					X
Marcelo Sammará	NO	2006	Búsqueda tabú					X
R. Tavakkoli Moghaddam	SI	2008	Algoritmo Genético Operador de cruza Estrategia de selección de padres Umbral de aceptación				X	X
José M. Vidal	SI	2010	Sistema Multiagente	X	X	X	X	X

la base de un número de nuevos conceptos, una heurística de construcción basada en eventos y detalla la capacidad del algoritmo para resolver instancias de problemas de la vida real.

Miguel Rebollo [Rebollo 2002] presenta un sistema multiagente para la resolución del problema de la ubicación automática en terminales de contenedores, minimizando el tiempo de permanencia de los barcos en la terminal. Realizando la investigación en un proyecto para la gestión integral de la terminal de contenedores de un puerto real. Sin hacer

una separación o definición formal de cada problema los abordar de forma independiente, relacionando cada uno de estos con el objetivo de minimizar el proceso completo. Justifica el uso del modelo de sistema multi-agente señalando que facilita abordar el diseño y posterior desarrollo de una aplicación lo suficientemente flexible, adaptable al entorno y versátil como para gestionar de manera eficaz una terminal de contenedores.

Kap Hwan Kim [Kim & Park 2004] aborda unicamente el problema de QCSP haciendo una presentación formal del problema y presentando un modelo matemático de programación lineal entera. En su artículo presenta diversas restricciones que forman parte de la naturaleza del problema y diseña un algoritmo heurístico de ramificación y poda de soluciones (Branch and Bound, BB por sus siglas en inglés) que utiliza para obtener la mejor solución factible para dicho problema. Tomando como base el tiempo requerido por el algoritmo BB presenta un algoritmo GRASP que utiliza un menor tiempo para localizar buenas soluciones factibles en un tiempo de computo razonable. Ambos algoritmos propuestos sirven como base para el desarrollo del modulo principal del sistema Logistic-CTP desarrollado en esta tesis.

En [Kim 2010] presenta un Framework para las operaciones de patio donde aborda los problemas relacionados con el acomodo de contenedores dentro de una terminal portuaria. En este framework considera un conjunto de recursos y restricciones que provocan interferencias entre ellos al momento de distribuir los contenedores en la terminal. Busca minimizar los tiempos requeridos para ubicar los contenedores dentro del patio y a su vez que dicha configuración permita a las grúas de patio atender la demanda requerida por las grúas de muelle. A diferencia de varios modelos de solución, este requiere una interacción directa con personal de la terminal.

Daniela Ambrosino [Ambrosino 2006] presenta un enfoque por descomposición para asignar las bahías de un buque de contenedores para el conjunto de los contenedores que se cargan en función de su destino final, de modo que diferentes porciones de la nave son considerados independientemente para la estiba. Posteriormente encuentra la solución óptima de cada subconjunto de las bahías con un modelo de programación lineal. Termina verificando la estabilidad del buque, del plan general de estiba y buscando su viabilidad mediante el uso de un algoritmo de intercambio que se basa en técnicas de búsqueda locales. Valida sus resultados mediante comparaciones con algunos casos de prueba de la vida real.

Los resultados que presenta Ambrosino así como las restricciones de su modelo se ajustan a los requerimientos presentados por IPM, sin embargo esta parte de la logística

de contenedores no influye directamente en los tiempos de atraque de un buque debido al hecho que gran parte de este proceso es realizado por las agencias navieras.

Alberto Delgado [Delgado 2010] introduce un modelo programación entera (IP) y de programación con restricciones (CP) para resolver el problema de CSSP. En el modelo CP utiliza las técnicas de modelado, incluyendo múltiples puntos de vista, las reglas específicas de poda de dominio y límites inferiores dinámicos. En el modelo IP muestra una fórmula de decisión 0-1, donde los cortes que se introducen son para reforzar la relajación del modelo IP. Introduciendo por primera vez técnicas modernas de modelado CP aplicadas a la planificación de estiba, y aunque se trata de un problema de optimización, que no es típicamente un tipo de problema en el que se aplican las técnicas de CP, resuelve más rápido las instancias con el software del estado de la técnica de CP, mediante la se aplicación del modelo de CP que con el software IP que desarrolla en su estado del arte, el cual aplicó a su modelo de IP. Concluyendo con las ventajas que presenta el modelo CP; la cual facilita a los modelistas industriales entender, mantener y extender dicho modelo ajustándolo a sus características principales. A diferencia de [Ambrosino 2006], Delgado formula el problema como un solo modelo, mientras que Ambrosino da solución al mismo dividiendo el problema en etapas. Ambos ofrecen soluciones al mismo problema pero desde puntos de vista que no permiten hacer una comparación entre sus soluciones.

Yongpei Guan [Yongpei 2002] en su artículo realiza una simplificación del BAP. Asigna a cada buque en espera de atracar un valor único de tiempo requerido para realizar las tareas de carga y descarga de acuerdo a su carga. Y mediante este paso crea una cola de objetos con las mismas características que esperan ser atendidos por un conjunto de muelles. Presenta un modelo donde realiza un análisis del peor de los casos y propone una heurística simple basada en el límite inferior teórico.

Ilaria Vacca [Vacca 2010] presenta una integración del BAP y el QCAP donde formula un modelo de programación lineal entera que busca minimizar el tiempo de estancia de un buque asignando una cantidad determinada de grúas a cada solución candidata. Evaluó el tiempo de estancia del buque mediante una simplificación de los tiempos requeridos por las grúas para atender la demanda de un buque. La integración de estos problemas los nombra como el problema táctico de atraque de buques (Tactical Berth Allocation Problem, TBAP por sus siglas en inglés). Utiliza una heurística tabú para encontrar la mejor solución factible que no violente el conjunto de restricciones planteadas en su modelo.

Marcello Sammarra [Sammarra 2006] mejora el modelo presentado por [Kim & Park 2004]

añadiendo una nueva serie de restricciones. Introduce el análisis gráfico de las instancias para el problema de QCSF y formula un algoritmo heurístico basado en una búsqueda tabú de soluciones candidatas. Las restricciones agregadas formulan una limitación debido a las restricciones de no simultaneidad de las tareas, la cual ocurre cuando dos tareas no pueden realizarse al mismo tiempo ya sea por cuestiones de seguridad del personal o estabilidad del buque de carga. Su heurística para localizar soluciones candidatas consiste en realizar movimientos de inserción e intercambio a una solución inicial. Estos cambios presentados por Samarra son retomados en este documento de tesis para generar nuevas poblaciones que logren evitar óptimos locales.

R. Tavakkoli Moghaddam [Tavakkoli 2008] retoma el modelo presentado por Kim y Park, agregando a este ventanas de tiempo que incrementan la complejidad del problema pero a su vez mejora la calidad de la solución al considerar que los buques no se encuentran al mismo tiempo en la terminal y estos pueden ingresar y salir durante el transcurso de la planeación de las operaciones de las grúas.

La complejidad planteada en este artículo permite modelar de forma mas simple todos los problemas abordados en la logística de contenedores debido a la estrecha relación entre los problemas. Basando en el sistema de épocas y periodos podemos modelar y predecir como sera la complejidad de las instancias en un tiempo determinado.

José M. Vidal [Vidal 2010] de la misma manera que [Rebollo 2002] propone un sistema multiagente que de una solución integral a todos los problemas de la logística de contenedores. Presenta un modelo donde diversos agentes interactúan entre si compartiendo información y el estado de cada uno de ellos. A diferencia de los demás sistemas multiagentes, Vidal establece relaciones y restricciones entre cada uno de los problemas, permitiendo a los agentes dar soluciones a cada uno de los posibles escenarios.

3.2. Software comercial existente

En la Tabla 3.2 se muestra el software afín más utilizado en el área comercial. En la primer columna se muestra en nombre del programa comercial; la siguiente la compañía que desarrollo dicho sistema y en la ultima el país de origen.

Todos los programas comerciales cubren las necesidades de las terminales portuarias, incluidas aquellas de tipo administrativo que no son contempladas en este documento. Estas soluciones requieren para su funcionamiento un equipo especializado que representa un gran costo para la industria portuaria; de la misma forma tiene un gran impacto por

Tabla 3.2: **Software comercial existente**

Programa	Compañía	País de Origen
Mainsail and Spinnaker	TideWorks	EUA
Navis	Cargotec	EUA
Maher Terminal Logistic System	Maher	Reino Unido
Advent	Advent Inc	Belgica

los altos costos de mantenimiento y capacitación de personal requeridos para el manejo de las aplicaciones, sin garantizar un desempeño óptimo en los procesos o un marco de referencia que permita evaluar la calidad de las soluciones planteadas, dejando en manos de personal especializado muchas de las decisiones más importantes.

3.3. Análisis del estado del arte

Existen gran cantidad de modelos de programación entera para dar solución a los problemas presentados anteriormente, debido a esto resulta un proceso complejo decidir cual es el indicado o el que mejor evalúa un problema. Ésta complejidad resulta por la naturaleza misma de los diversos casos de estudio que evalúan cada uno de los autores mencionados en la Tabla 3.1. La propuesta de solución de esta investigación ajusta los modelos que mejor se adecuen a las necesidades de IPM y priorizando aquellos que por su naturaleza influyan en mayor proporción en los costos de operación de las actividades realizadas dentro de la terminal marítima.

Capítulo 4

Modelo de Solución

Los buques siguen una ruta preestablecida denominada “Ruta Naviera”, la cual conecta diversos puertos alrededor del mundo. Las rutas navieras son recorridas mediante buques portacontenedores en intervalos de tiempo regulares. Ésta regularidad permite asumir que los buques recorren la ruta en un lapso de tiempo uniforme. Al realizar esta simplificación se facilita modelar el recorrido de una ruta naviera de forma circular. Las rutas navieras son representadas en el conjunto $N = \{\eta^1, \eta^2, \eta^3, \dots, \eta^{|N|}\}$ (ver Figura 4.1), siendo N el conjunto universal de todas las rutas navieras existentes.

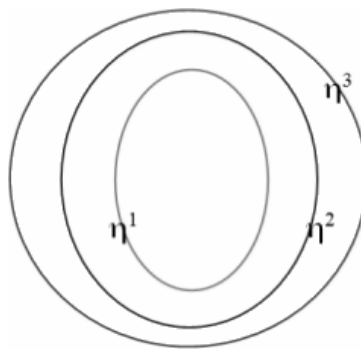


Figura 4.1: Conjunto de rutas navieras

Los buques que recorren una ruta naviera son establecidos por las autoridades correspondientes. Cuando la ruta sufra alteraciones o modificaciones podrá entonces contar con un mayor o menor número de buques asignados o puertos que deberá cubrir; alterando así el modelo visual donde serán reflejados dichos cambios.

Los buques están representados en el conjunto $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_{|V|}\}$, engloba todos los buques de todas las rutas navieras. Con fines prácticos solo serán considerados aquellos que transportan contenedores de mercancías.

Todos estos buques deben pertenecer solo a una ruta. Además, todas las rutas deben contar con al menos un buque el cual puede recorrer dicha ruta en cualquier sentido ó ser reemplazado por otro. Al agregar los buques pertenecientes a cada ruta naviera se modifica el modelo visual, tal como se muestra en la Figura 4.2.

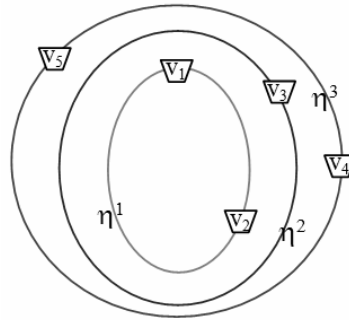


Figura 4.2: Buques asignados a sus respectivas rutas

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 4.3), donde cabe hacer mención que el tamaño de las circunferencias no guarda relación con la velocidad de recorrido de las mismas. 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.

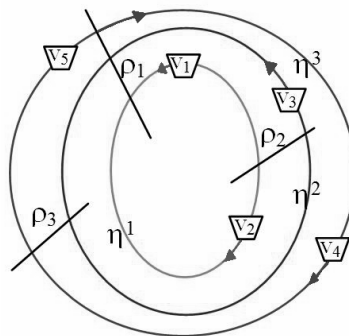


Figura 4.3: Modelo vista - radar

Utilizando este radar se puede describir con una mayor facilidad, las actividades de cada una de las terminales en diversos periodos de tiempo por ejemplo. En un periodo determinado la terminal ρ_i deberá dar servicio a los buques v_1, v_3 y v_4 de forma simultánea, esto implica resolver el problema de ubicación de los buques, asignación de grúas para cada buque y demás problemas que generan.

Al realizar el análisis del modelo vista-radar con sus componentes más importantes que conforman parte del proceso de logística de contenedores podemos apreciar diversos problemas planteados en la literatura en un estado de tiempo determinado.

Los problemas que se aprecian de forma clara son el problema de asignación de atraque de buques (BAP). También se logra apreciar el recorrido de un buque dentro de su ruta y en particular la temporalidad de su carga, que está presente en el problema de estiba de contenedores en buque (CSSP). Mediante estos problemas podemos apreciar si una terminal portuaria cuenta con la capacidad operativa para hacer frente a los mismos.

4.1. Procesamiento de los contenedores

La productividad de una terminal portuaria puede medirse en términos de la productividad de el envío y recepción de contenedores dentro y fuera de la terminal que involucra una gran cantidad de procesos administrativos y de logística. Los problemas de acomodo dinámico de contenedores dentro de la terminal se simplifican para atender solo la parte correspondiente a la ubicación de estos dentro del patio de la terminal. Solo serán procesados por el modelo aquellos pertenecientes al área de exportación, la cual representa una de las partes mas importantes dentro de la logística de contenedores en el modelo propuesto.

El problema acomodo de contenedores en patio CPP, tiene como objetivo la elaboración de planes eficientes de acomodo y ha sido objeto de estudio por diversos investigadores en el área. Se ha incorporado el término dinámico para denotar otro aspecto que dificulta la planeación. En la actualidad algunos autores han introducido el manejo de la temporalidad mediante el uso de épocas y periodos de tiempo para cuantificar con mayor precisión los arribos y salidas de los diversos elementos que definen la logística de contenedores, entre dichos elementos se encuentra el posicionamiento de contenedores en el patio de la terminal portuaria [Bazzazi 2009].

Los periodos de tiempo son evaluados de forma lineal desde el inicio de la época, que es la cantidad de periodos de tiempo a estudiar, hasta la terminación de la misma [Bazzazi 2009]. Están representados por t_i donde el periodo inicial de una época es t_0 y el periodo final t_1 .

Una época está representada en el conjunto $\varepsilon = \{t_0, t_0 + 1, t_0 + 2, \dots, t_0 + K - 1, t_1\}$ que contendrá la cantidad de periodos que se busca analizar durante un lapso de tiempo determinado. Una época será el espacio de búsqueda utilizado para diseñar una estrategia

que permita predecir diversos eventos con una probabilidad determinada de ocurrencia. De forma inicial el modelo requiere conocer una cantidad de K periodos de tiempo en que será dividida la época.

Las rutas navieras cuentan con buques que recorren las terminales en diferentes lapsos de tiempo. En un lapso de tiempo dado una carga de contenedores puede ser enviada en un buque y otra carga diferente ser enviada en el mismo buque pero en otro periodo de tiempo. Para identificar los diferentes arribos de un buque, se utiliza la variable v_i para denotar al conjunto de los destinos que recorrerá el buque partiendo desde la terminal actual en un periodo de tiempo determinado. Se crea una v^i cuando una orden de servicio de un buque llega a una terminal portuaria. Tomando como ejemplo la Figura 4.3, para el buque v^3 , su conjunto de destinos es $v^3 = \{\rho_1, \rho_3, \rho_2\}$. Esta acción inicia el proceso de arribo de los contenedores para el buque v^3 ; este punto es indicado como τ_0^v que señala el periodo t_i en la época que se está analizando. El punto de terminación del periodo es el día que se espera arribe el buque y está indicado como τ_1^v , el cual indica un periodo de tiempo t_j en la época de estudio. Los puntos marcan el periodo de arribo de contenedores para el buque v_3 . Los K puntos intermedios entre el inicio y fin del arribo de contenedores de un buque están definidos en la ecuación 4.1 y se muestran como:

$$t_i = \tau_0^v + k \quad \forall 0 \leq k \leq K, \quad \text{donde} \quad K = \tau_1^v - \tau_0^v \quad (4.1)$$

Durante el trayecto del buque a la terminal portuaria los contenedores serán enviados por los diversos clientes a la terminal portuaria y una parte de los contenedores que serán cargados en dicho buque serán consolidados dentro de la terminal. La Tabla 4.1 representa un esquema donde se indican los periodos donde serán medidos las cantidades de contenedores que se espera arriben o han arribado a la terminal por alguno u otro medio de transporte.

$$v_1 : \quad \boxed{\tau_0^1 \mid \tau_0^1 + 1 \mid \tau_0^1 + 2 \mid \tau_0^1 + 3 \mid \tau_0^1 + \dots \mid \tau_0^1 + K - 1 \mid \tau_1^1 = \tau_0^1 + K}$$

Tabla 4.1: Esquema para indicar los tiempos de arribo de contenedores a una terminal

El apilamiento de los contenedores ya sea de exportación o importación se realiza en bahías, la cantidad de bahías utilizadas es una forma de medir la calidad de las heurísticas o métodos utilizados para dicho fin [Loo 2007], cuanto menor sea el número de bahías utilizadas se indica una mejor calidad en la solución.

El máximo apilamiento de los contenedores no garantiza una carga mejor, debido a que esta depende de las condiciones en que arribara el buque y como deberán ser cargados

los contenedores en dicho buque, de tal forma que es necesario utilizar un mayor número de bahías cuando sea factible en aras de mejorar el tiempo de envío a las grúas de muelle que realizarán las tareas de carga.

En base a lo anterior la forma de medir la capacidad de carga de una terminal portuaria no es en la cantidad de contenedores que se encuentran dentro de la terminal, sino la cantidad de bahías que han sido necesarias para apilar dicho conjunto de contenedores.

La cantidad de bahías probables a ocupar mas las que están en uso, está representada por α_{τ}^i , donde i representa el buque donde serán cargados y el índice τ el valor de $\tau_0^v + k$ correspondiente al periodo. 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 4.4. Cada renglón representa el tiempo en que los contenedores para el buque v_i deberán llegar a la terminal portuaria.

$v^1:$	α^1_1	α^1_2	$\alpha^1_{...}$		α^1_T	
	$v^2:\alpha^2_1$	α^2_2	α^2_3	α^2_T		
		$v^3:\alpha^3_2$	α^3_3	$\alpha^3_{...}$	α^3_T	
		$v^4:\alpha^4_2$	α^4_3	$\alpha^4_{...}$	α^4_T	
t_0	t_0+1	t_0+2	t_0+3	...	$t_0+k - 1$	t_1

Figura 4.4: Demanda 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 4.5. La cantidad de bahías necesarias para almacenar el conjunto de contenedores en cada periodo es utilizada para conocer el estado actual de la terminal.

Si en la terminal portuaria se cuentan con una cantidad limitada de contenedores y esta cantidad es menor que el número teórico de bahías a utilizar indicará si se deberán endurecer las restricciones de almacenamiento para aumentar el nivel de apilamiento de los diversos contenedores. De esta forma podemos ajustar los parámetros necesarios en los algoritmos que permitan dar un acomodo óptimo en base al aumento en el apilamiento. En caso de contar con un número holgado de bahías disponibles se propondrá realizar un acomodo que mejore los tiempos de carga en el buque.

En la Figura 4.4, seleccionamos el periodo de tiempo t_3 donde se espera utilizar $\alpha^1_2 + \alpha^2_1 + \alpha^3_2 + \alpha^4_2$ bahías. En la Figura 4.5, en la parte de selección observamos cuántas bahías

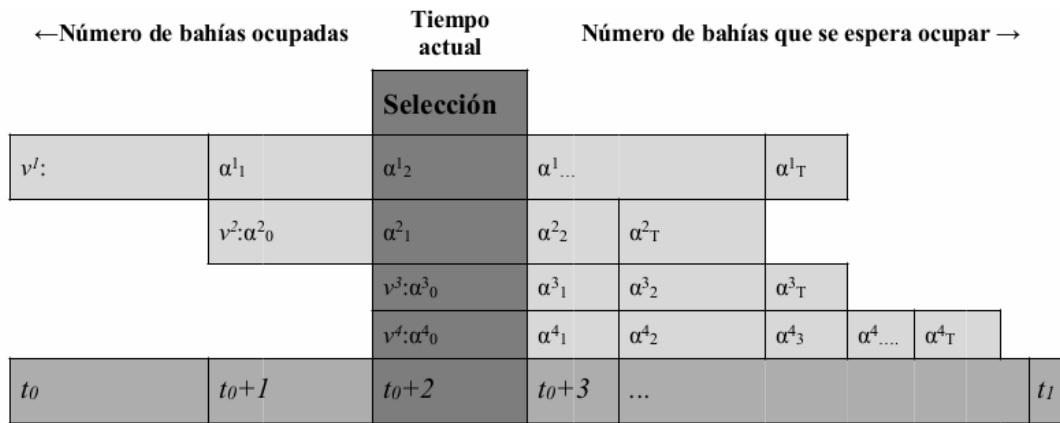


Figura 4.5: Selección de un periodo de tiempo en la época.

se espera utilizar en la terminal, y cuantas están siendo utilizadas en dicho periodo. Cada una de las α^i_j es igual a la suma de sus predecesores.

Una vez definida la cantidad de contenedores que arribaran a la terminal. Los contenedores esperados por IPM son registrados en la lista de espera enviada por la agencia naviera, de esta forma el personal de IPM selecciona con anterioridad la cantidad de espacios que le serán asignados a un grupo de contenedores marcados con el mismo buque-destino. Cada bloque será indicado en el patio y esta conformado por un número n de bahías que tendrán una capacidad de almacenamiento igual o mayor que el número de contenedores esperado.

El CPP, para IPM, puede ser modelo a su vez como un BPP con objetos frágiles y cola de objetos, el cual es ampliamente abordado en la literatura [Basse S. 1998]. Para utilizar el BPP con sus dos variantes se considera entonces que se tienen un número finito de contenedores que deben ser ubicados según sus características en n bahías donde cada bahía puede almacenar hasta 18 o 30 contenedores de acuerdo al tipo de grúa de patio utilizada para su apilamiento.

Una vez que se define la cantidad de bahías que serán utilizadas por cada buque-destino. El proceso queda a la espera del arribo de los contenedores. Cuando esto ocurre se les asignara una posición predeterminada que buscara, de acuerdo a diversas heurísticas proporcionadas por IPM, la mejor posición correspondiente para dicho contenedor.

4.2. Modelo de solución para el CPP

La solución para el CPP cuenta con un número n de bahías disponibles para contenedores de 20 y 40 pies para cada uno de los buque–destino que almacenará. En base a estos datos se determina cuantas bahías de patio serán requeridas para almacenar los contenedores durante un periodo de tiempo determinado. Mediante este proceso de simplificación se reduce el proceso global, al reducir la complejidad planteada en el estado del arte, permitiendo almacenar un número dinámico de contenedores de tamaño s sin que estos sobrepasen la capacidad máxima de la suma de espacios disponibles por bahía. Los contenedores que llegan a la terminal tienen un orden de ingreso aleatorio y son depositados en una zona respectiva del patio la cual cuenta con un identificador de zona, un número de fila y un número de bahía. Estos contenedores tienen un número único de serie en el mundo que determina muchas de sus principales características como el tamaño, peso, capacidad máxima, etcétera, sin embargo no es suficiente para localizarlo en el patio, por tal motivo al inicio de su número de serie se le agregara la letra correspondiente a la zona de patio donde estará, así como el número de fila, nivel y bahía que le fue asignado. La Figura 4.6 ilustra un ejemplo del número de serie de un contenedor.



Figura 4.6: Ejemplo de un número de serie para un contenedor.

En la Figura 4.7 se ejemplifica el modelo de solución propuesto para el problema de CPP. Una vez que es seleccionada la posición del contenedor se coloca su etiqueta correspondiente a la tabla de contenedores. Si existe un contenedor en otro nivel éste será indicado en la misma bahía para indicar que dicha posición cuenta con diferentes niveles y nos permita determinar cuantos movimientos de contenedores son necesarios para acceder a un contenedor deseado.

Por ejemplo, llega el contenedor CT2 a la terminal y se determina su ubicación en la

zona 6X, al ser super pesado estará en la fila 6 de la bahía 4 destinada para New York, y quedará ubicado en el nivel 2 al estar ocupado el primer nivel. El número de identificación que usara ahora será 6X-642-CT2, mediante este formato podremos determinar la ubicación y los costos asociados con cualquier movimiento realizado en la bahía de los contenedores.

Fila / Bahía	2	3	4	6
F	6X-621-CT21	6X-631-CT7	6X-642-CT2 , 6X-641-CT84	6X-661-CT21
E	6X-521-CT3	6X-531-CT90		
D	6X-521-CT54	6X-432-CT102, 6X-431- CT12		
C		6X-333-CT34,6X-331-CT32, 6X-331-CT66		
B				
A				

Figura 4.7: Ejemplo de solución CPP.

4.3. Modelo de solución planteada para el CSSP

Una vez que el personal de IPM requiera hacer una planeación de carga para el buque, todos los contenedores localizados dentro del bloque n deberán ser reubicados en el buque m . Personal de IPM indica al sistema el área que deberán ocupar los contenedores; esta nueva área o sección de buque tendrá una capacidad mayor o igual que el espacio requerido por los contenedores. Este proceso tendrá diversas restricciones que limitan el número de combinaciones posibles que pueden generarse. Los bloques que formarán la carga del buque requieren cumplir las restricciones de tamaño del contenedor y peso total de la pila de contenedores generada. Cada uno de estos bloques conlleva un costo medido en movimientos de grúa de patio, es decir, llevar un contenedor de una posición i a una posición j implica un número t de movimientos de grúa.

Cada vez que un contenedor k_i es llevado de su posición i en el patio a su nueva ubicación j en el buque, el número de movimientos requeridos para mover los demás

contenedores es actualizado en base a la posición que ocupará ahora la grúa de patio y cuantos contenedores siguen ubicados arriba de un contenedor k_j .

Partiendo de estos datos el número total de movimientos T requerido para llenar un bloque de contenedores en el buque es la suma de los movimientos necesarios para llevar cada uno contenedores de patio a buque.

Todos los contenedores marcados para ser ubicados en el buque deben ser considerados en la solución, el tiempo optimo es aquel que realice el menor número de movimientos en patio. En base a esto CSSP será modelado como TSP donde se busca que la suma de los movimientos del recorrido de todos los contenedores a su posición en el buque sea la menor posible.

El buque representa un problema similar al acomodo de contenedores en patio, agregando a este la restricción de peso máximo de cada apilamiento en la bahía y su correspondiente estabilidad vertical y horizontal.

Este modelo de acomodo de contenedores para buque recibirá como entrada la tabla de contenedores de patio previamente creada. Los contenedores serán agrupados de acuerdo a su peso y destino en la sección que el personal de IPM indique en el buque. Será ubicado un bloque de contenedores específico que cumpla las características de buque-destino para dicha sección.

El modelo selecciona el orden en que los contenedores de patio serán asignados a cada espacio del bloque de bahías indicado. La solución a este problema indicará una secuencia de contenedores que serán la solución inicial candidata parcial para el siguiente proceso. La solución inicial candidata parcial representa en si, una secuencia de n pasos que genera una solución donde son utilizados los n objetos de la solución. Una representación gráfico de la solución se puede apreciar en la Figura 4.8.

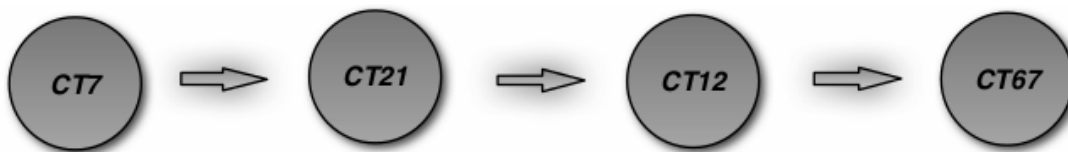


Figura 4.8: Representación gráfica de la solución inicial parcial CPP.

Cada nodo de nuestra solución inicial contendrá la posición que ocupara el contenedor en el buque. Las aristas que conectan cada nodo representa el número de movimientos necesarios para llegar a dicho contenedor, como se observa en el ejemplo de la Figura 4.9.

El nodo $CT7$ al revisar la tabla de contenedores en patio, de la Figura 4.9, se lee la

Fila / Bahía	2	3
F	6X-621-CT21	6X-631-CT7
E	6X-521-CT3	6X-531-CT67
D	6X-521-CT54	6X-432-CT102, 6X-431-CT12

Figura 4.9: Segmento de la tabla de contenedores en patio.

parte 631. El indicador 6X indica la zona de patio usada para almacenar el contenedor. El 6 representa la fila en que esta ubicado el contenedor y no representa ninguna costo de movimientos pues sólo es utilizado como referencia.

El número siguiente 3 será utilizado para obtener la k_j -ésima posición de la grúa de patio que moverá ese contenedor; si suponemos que la grúa de patio esta justo en esa bahía entonces mover la grúa de la posición k_i -ésima a la k_j -ésima tendrá un costo de 0 movimientos.

El siguiente número 1 indica el nivel en que esta localizado el contenedor. Al estar éste en la primera posición de la lista de contenedores en esa ubicación tendrá un costo de un movimiento para que pueda ser desplazado. De esta forma podemos calcular el costo de movimientos requeridos para llevar el contenedor a su bahía de buque correspondiente:

$$\text{Costo} = \text{Costo (Zona)} + \text{Costo(Grúa)} + \text{Costo(Contenedor)}$$

donde cada función Costo() representa los movimientos requeridos para ubicarse en esa posición. Por ejemplo para el nodo CT7 tendremos:

$$\text{Costo} = 0 + 0 + 1$$

donde Costo=1, realizando los cálculos correspondientes para cada nodo obtenemos la Figura 4.10:

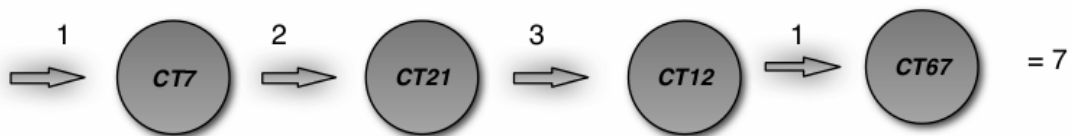


Figura 4.10: Solución inicial candidata parcial con pesos en las aristas.

El costo de nuestra solución inicial candidata parcial es de 7 movimientos. Realizando

un análisis de la solución inicial parcial podemos modelar el proceso de envío de contenedores en patio a buque como un problema del Agente Viajero porque que todos los contenedores indicados para ser cargados deben ser ubicados en el buque en una área determinada por IPM y mover cada contenedor representa un costo medido en movimientos de desplazamiento que involucra a su vez un tiempo determinado para cada movimiento. La configuración de carga del buque involucra diversos destinos D donde cada uno representa un bloque distinto para cargar contenedores teniendo entonces n destinos. La unión de estos destinos representa una solución inicial para CPP al generar una distribución de carga como se muestra en la Figura 4.11.

Fila / Bahía		6	5	4	2
F	"				
	II			6X-642-CT2	
	I	6X-621-CT21	6X-631-CT7	6X-641-CT84	6X-661-CT21
E	"				
	'				
	I	6X-521-CT3	6X-531-CT90		
D	III				
	II		6X-432-CT102		
	I	6X-521-CT54	6X-431-CT12		
C	III		6X-333-CT34		
	II		6X-332-CT66		
	I		6X-331-CT32		

Figura 4.11: Solución inicial factible para el CPP.

Cada uno de los bloques de buque tiene a su vez diversas restricciones particulares de cada buque dichas restricciones sin embargo sólo se evaluarán si un contenedor puede estar o no en esa posición por lo que no incrementan la complejidad del modelo y sólo limitan el número de soluciones factibles posibles que puedan ser generadas.

Esta solución inicial genera una carga completa para el buque, la cual será realizada

mediante grúas de muelle. La carga completa del buque será modelada de igual forma que el patio como se muestra en la Figura 4.11, siguiendo la misma nomenclatura

4.4. Modelo de solución para el BAP

Existen diversos métodos que solucionan este problema en base a un tiempo de completación aproximado de las tareas de cada buque. En este documento se plantea una solución a este problema midiendo el tiempo de completación 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. Esta simplificación se obtiene al tratarse de una sobrecarga de buques y es indispensable contar con el máximo número de recursos disponibles.

En la Figura 4.12 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 4.12 se ilustra en la Figura 5.5 que representa una instancia para el BAP. Explotando la solución que genera el modelo matemático de Kim y Park se evalúan las diversas combinaciones de buques.

4.5. Modelo de solución para el QCAP

El problema de asignación de grúas de muelle decide, en base a la experiencia de los expertos en el área, la cantidad necesaria de recursos que serán asignados a cada buque. Este problema puede recibir dos instancias. La primera ocurre si la solución del BAP requiere utilizar el máximo número de muelles disponibles, en ese caso particular se asignará la máxima cantidad de grúas de muelle disponibles. En el segundo caso, se decide cuántas grúas podrían requerir los buques atracados. La decisión para el caso dos será evaluada mediante la solución del QCSP. Se realizará una búsqueda local para tratar de asignar una menor cantidad de recursos en caso de que esto mejore el tiempo de completación, se continúa con la búsqueda local; en caso contrario se detiene la búsqueda.

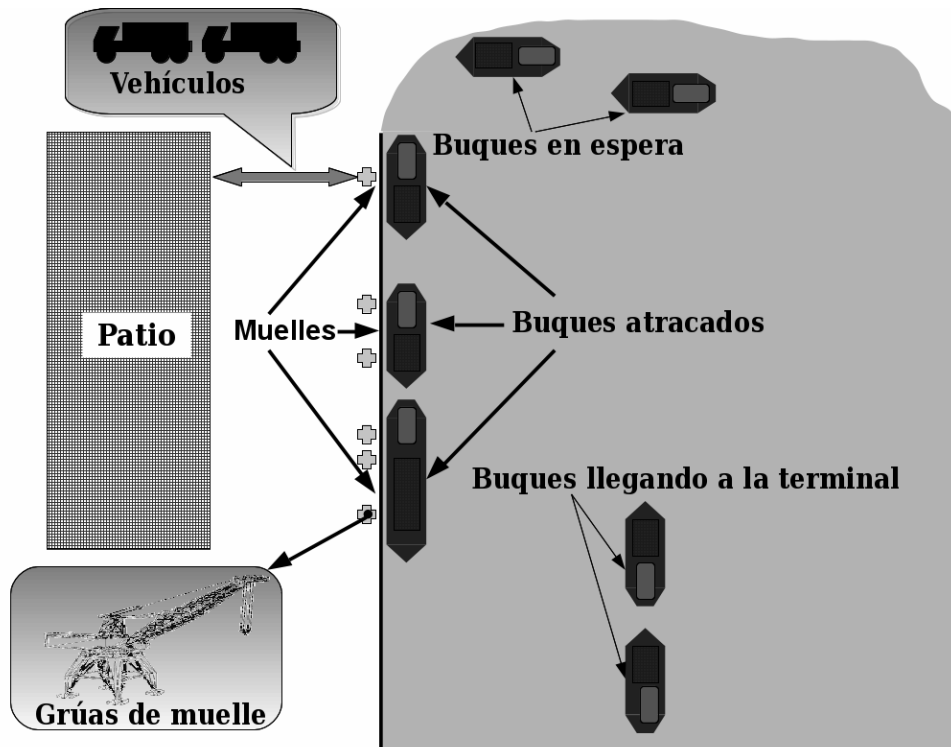


Figura 4.12: Ejemplo de instancia BAP.

4.6. Modelo de solución para el QCSP

QCSP recibe una instancia como la Figura 4.14, a modo de entrada de datos, mediante esta información determina la secuencia de carga que requiera el menor tiempo posible para realizar todas las tareas. La instancia cuenta con diez tareas y se requiere realizar cada una de ellas. Cada grúa puede seleccionar una tarea a la vez. Cuando son seleccionadas todas las tareas se genera una secuencia de solución.

Existe un paralelismo en la realización de tareas al seleccionar cada grúa una tarea en un tiempo determinado. Por ejemplo, la grúa uno puede seleccionar las tareas, 1, 2, 3, 4 y 5 mientras la dos seleccionara el resto, 6, 7, 8, 9 y 10.

Mediante este procedimiento se genera la siguiente secuencia.

$$k^1 = \{1, 2, 3, 4, 5\}$$

$$k^2 = \{6, 7, 8, 9, 10\}$$

Buque	Carga de trabajo	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 4.13: Instancia BAP.

Tarea	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tiempo requerido	10	5	5	3	6	10	8	4	10	7
Ubicación	1	3	3	3	5	1	3	3	5	7
Restricciones	$\Phi = \langle \{6,1\}, \{7,8\}, \{8,4\}, \{3,2\}, \{9,5\} \rangle, \psi = \langle \emptyset \rangle. K = 2 = 1, =7$									

Figura 4.14: Instancia para el QCSP

Al unir los dos grupos se obtiene la secuencia de trabajo $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$, la cual aun cuando no es factible si es una de las posibles soluciones posibles a generar. Las n tareas a realizar generan n factorial combinaciones posibles de solución, para instancia de la Figura 4.14 existen 3,628,800 combinaciones probables, de las cuales solo unas pocas son factibles.

Kim y Park proponen un método "*Branch and Bound*" que permita generar soluciones factibles limitando la cantidad de tareas seleccionables para cada grúa de acuerdo a la posición actual que se localicen y que no violenten ninguna de las restricciones planteadas en su modelo. Con la instancia de la Figura 4.14 la grúa k^1 podrá elegir entre la tarea 6, 7, 9 o 10 las cuales cumplen con algunas restricciones del modelo. Sin embargo la tarea 10 rompe las restricciones de la posición de las grúas al estar ubicada en la misma bahía que la grúa k^2 por tal motivo, no podrá ser considerada. Mediante este sencillo método la grúa k^1 seleccionara de forma aleatoria una tarea del conjunto 6, 7, 9. Al seleccionar dicha tarea actualizará su posición actual lo que cambiara las tareas disponibles para las demás grúas.

La forma para seleccionar las tareas de las grúas se realiza de la siguiente forma. Todas las grúas seleccionaran una tarea inicial del conjunto de soluciones posibles, la cual no rompa con las restricciones. Una vez que todas las grúas tienen o cuentan con la tarea inicial posible, se buscara la grúa con el menor tiempo de terminación. A dicha grúa se le asignara una nueva tarea factible y se le restara el tiempo de la misma a las demás tareas pendientes de completación. El proceso continua hasta que todas las tareas han sido asignadas.

La solución generada indicara las operaciones que realizara cada grúa. Una solución factible al ejemplo anterior quedaría de la siguiente forma:

$$k^1 = \{6, 1, 7, 8, 4, 3, 2\}$$

$$k^2 = \{9, 5, 10\}$$

Cuando se desglosa la solución se genera la siguiente secuencia de movimientos en la Figura 4.15.

Tiempo Mínimo	Grúas					
	k^1			k^2		
	Tarea	Bahía	Tiempo	Tarea	Bahía	Tiempo
7	6	1	10	10	7	7
3	6	1	3	5	5	6
3	1	1	10	5	5	3
7	1	1	7	5	5	9
2	1	1	0	5	5	2
8	7	2	8	0	7	0
4	8	2	4			
3	4	2	3			
5	3	2	5			
5	2	2	5			
TOTAL: 47	No existen más tareas disponibles					

Figura 4.15: Solución de 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.

El tiempo requerido para realizar el total de las tareas, es el máximo de la suma de los mínimos generados en la solución. En nuestro ejemplo para la solución generada se requieren 47 unidades de tiempo. A pesar de reducir el número de tareas que pueden realizar las grúas existe un amplio número de secuencias posibles, dentro de las cuales, en experimentos recientes se ha logrado demostrar que existen también diversas soluciones óptimas.

4.7. Comunicación entre procesos

Los procesos involucrados en la logística de contenedores requieren leer sus datos de entrada de acuerdo al formato establecido en la literatura. Los problemas abordados sin embargo no son acordes con la literatura al contar con diversas modificaciones y adecuaciones necesarias para dar solución al caso de estudio de IPM. Cada uno de los procesos recibirá un archivo de texto claro con su formato correspondiente.

4.8. Modelo de solución para Logistic-CPT

Los procesos involucrados en la logística de contenedores se ilustran en la Figura 4.16. El proceso de solución inicia cuando la terminal portuaria recibe la hoja de contenedores que se espera arriben para un buque determinado. Mediante este procedimiento se inicia el arribo de contenedores a la terminal.

En la terminal portuaria se utiliza información del estado del patio para determinar la cantidad de bahías disponibles para almacenar un conjunto de contenedores, de un buque-destino en particular, que se espera arriben durante un periodo de tiempo determinado. Esta información junto con la cantidad de contenedores que se espera arriben genera el formato de entrada para dar una solución CPP, tal como se ilustra en la Figura 4.17.

En este punto una solución BPP simple determinará el número mínimo de bahías necesarias. A modo de simplificación se determina utilizar grúas de patio con capacidad

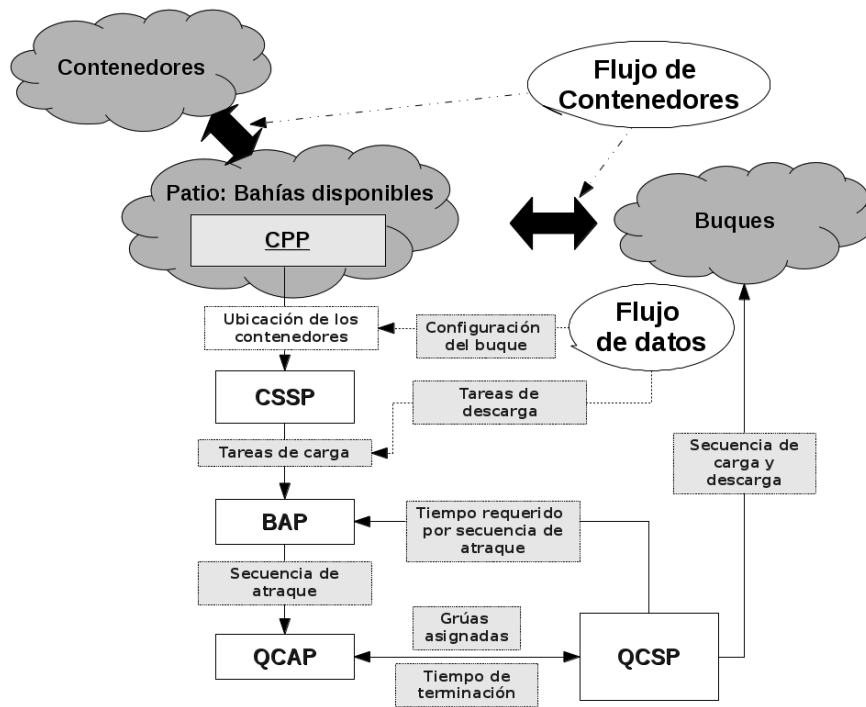


Figura 4.16: Modelo de solución Logistic CPT

Contenedores por arribar	Contenedores de 20"	Contenedores de 40"	Bahías disponibles	Buque destino
45	30	15	30	v ¹

Figura 4.17: Instancia CPP

de cinco niveles de apilamiento. Esto genera como resultado un mínimo de tres bahías para ubicar los 45 contenedores, los contenedores de 20 pies utilizarán una sola bahía y los de 40 pies requieren dos bahías para ser apilados en patio. En el proceso las bahías que utilizan los contenedores de 40 pies serán reetiquetadas como una sola, teniendo un número par que indicara su tamaño. Sin embargo se descontaran tres bahías al número total de bahías disponibles.

Este proceso continua hasta que un buque- destino (v^1 en nuestro caso) esta por arribar a la terminal. En el momento que se aproxima la fecha de arribo se detiene la recepción de contenedores y se procede a realizar la configuración de carga de contenedores.

La solución generada por CPP (ver Figura 4.7) indica donde están ubicados los contenedores en patio, a esta información se anexa la configuración del buque después de realizar las tareas de descarga. Generando un archivo de configuración para la instancia

de CSSP (ver Anexo A). Con esta información se genera una carga completa del buque y se procede a generar bloques de contenedores mas pequeños que distribuyan de forma equitativa la carga de trabajo de las tareas de carga y descarga generadas.

Cuando arriba un número superior de buques al que puede ser atendido se requiere evaluar una secuencia que minimice el tiempo de estancia de los buques, ofreciendo el sistema una solución al BAP Esta información permite generar una instancia QCSP (ver Figura 4.14). Mediante una iteración entre QCAP y QCSP se determina un número apropiado de grúas para realizar las tareas que se afronten en el periodo de tiempo indicado de la terminal.

4.9. Función objetivo para Logistic CPT

El modelo general tiene como objetivo minimizar los tiempos de estancia de los buques atendidos en el periodo de tiempo indicado. Al realizarse estos periodos en una época de tiempo delimitada y determinada por personal de IPM, la función objetivo queda definida en 4.2 como:

$$\text{mín} \sum_{t=0}^{\epsilon} \{ \alpha_1 * W + \alpha_2 \sum_{k=1}^K Y_k \} \quad (4.2)$$

La primer sumatoria consiste en evaluar el tiempo de completacion evaluado de acuerdo a la función objetivo de QCSP. Esto indica que todos los proceso serán evaluados conforme al tiempo que requieran las grúas para realizar todas las tareas de los buques evaluados en el periodo de tiempo indicado. De esta forma se evalúa toda la época indicada por el tomador de decisiones.

4.10. Restricciones del estado del arte

La simplificación de CPP y CSSP eliminan la necesidad de evaluar algunas de las restricciones planteadas en el estado del arte. Las restricciones para BAP, QCAP y QCSP permanecen inamovibles conforme a los modelos presentados en el modelo de solución de cada problema.

4.11. Restricciones particulares del caso de estudio

El problema CPP requiere que se evite combinar contenedores de diversos destinos, sin embargo, esta restricción será ignorada por el algoritmo de solución en casos particulares que se llegan a presentar por sobre cupo en la capacidad de almacenamiento de la terminal.

Las restricciones del CPP se reducen a las características particulares de cada buque, estará se evaluara por el capitán del buque y determinara si es factible o infactible la solución propuesta.

Capítulo 5

Metodología de Solución

5.1. Esquema general de solución

Los modelos de solución ilustrados en la Figura 5.1, se obtuvieron en base a diversas entrevistas realizadas con el personal especializado de IPM, que son considerados dentro de la industria como expertos en el área. Éstas heurísticas obtenidas en combinación con los modelos de solución presentadas por los diversos autores en la literatura especializada, sirvieron de base para generar el sistema Logistic-CPT.

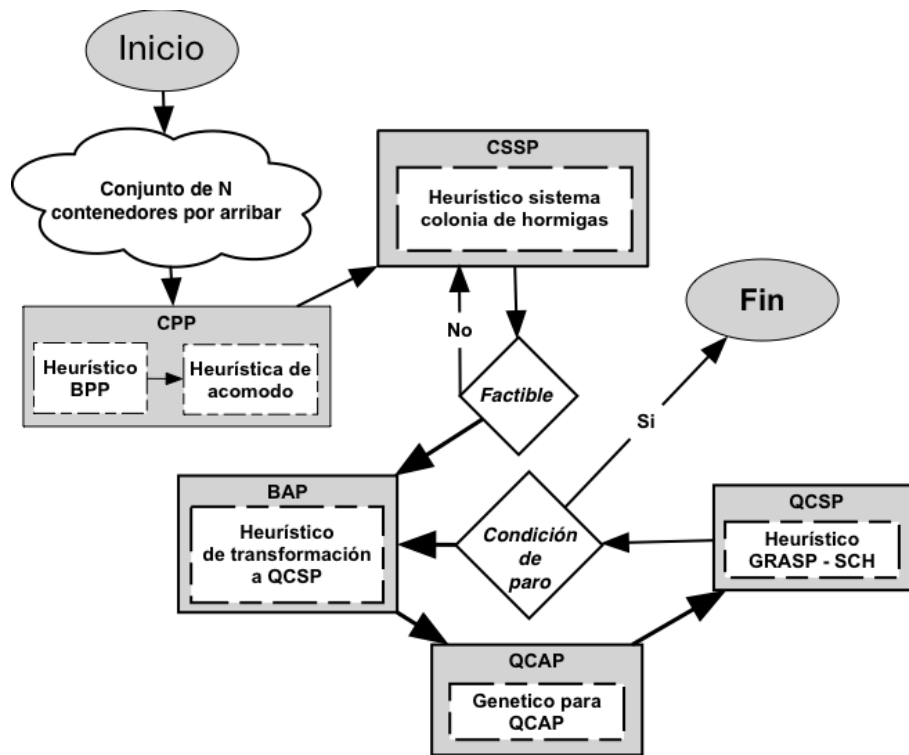


Figura 5.1: Esquema general de solución Logistic-CPT

5.2. Solución heurística para CPP

La heurística planteada en éste documento de tesis para obtener una solución al problema de posicionamiento de contenedores en patio (CPP), se divide en dos etapas, la primera etapa, obtiene las bahías mínimas necesarias (b^k) para ubicar los contenedores en patio realizando una simplificación de una parte del CPP a un problema de empaquetamiento (Bin packing problem, BBP por sus siglas en inglés)[Klein R]. La segunda etapa maneja la aleatoriedad del arribo de contenedores (C) creando un conjunto de reglas para ubicar los contenedores c^i que arriban a la terminal. Los contenedores serán ubicados en base a los conjuntos de bahías (b^k) asignados para cada buque-destino (v^i).

La primera fase de este modelo de solución se detalla en la Figura 5.2 e inicia al recibir la cantidad esperada de contenedores por arribar en el periodo de tiempo t_0 y las bahías disponibles B^f en la terminal portuaria.

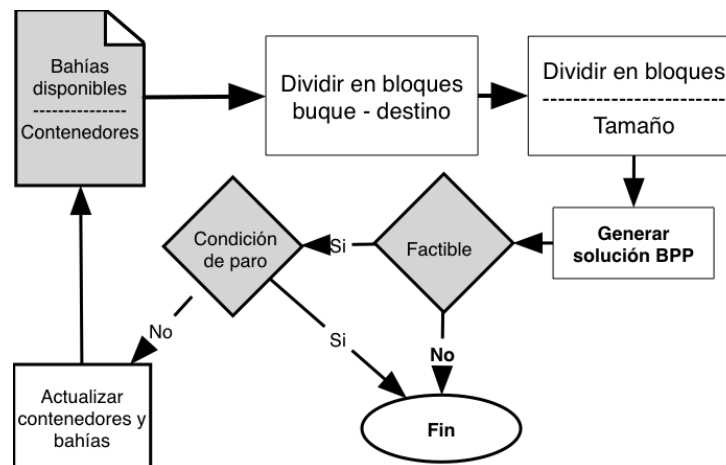


Figura 5.2: Heurística de solución para CPP

Con ésta información se genera un estado de espera de arribo de contenedores para t_0 , el cual de acuerdo a las estadísticas proporcionadas por [IPM] arriban a la terminal al menos un 90 % de los contenedores esperados C . Con esta información teórica se procede a generar un conjunto de bloques de bahías B mínimos necesarios para almacenar los contenedores en base a las restricciones de buque-destino.

El resultado de éste proceso genera información suficiente para simplificar el siguiente paso como un BPP, el cual retornará la cantidad mínima de bahías necesarias para almacenar los contenedores esperados, tomando como información inicial el conjunto de bloques generados para almacenar los contenedores que se espera arriben a la terminal en

un lapso de tiempo determinado. El lapso mínimo de estancia de los contenedores en la terminal se determina por la fecha en que se espera arribe el buque a la terminal.

Al termino de la primera etapa se actualiza la información del estado del patio de la terminal portuaria y continua hasta que todos los pedidos de arribo de contenedores sean procesados. Para casos prácticos de estudio se considera este ciclo como finito, sin embargo en la vida real este proceso se repite de forma indefinida y ocurre al mismo tiempo que los contenedores, que ya cuentan con un grupo de bahías para ser ubicados, arriban al patio de la terminal.

Cabe destacar que el tomador de decisiones del área de contenedores decidirá los pasos a seguir cuando el modelo no encuentre una solución factible, que ocurre cuando los contenedores esperados superen la cantidad de bahías requeridas.

Una vez asignadas un conjunto de bahías b^k que podrá utilizar cada subconjunto de contenedores C^n . El siguiente paso para solucionar el CPP es acomodar los contenedores, que llegan a la terminal en un orden aleatorio, en el patio de la terminal portuaria. La heurística planteada para dar solución a este paso se rige por el siguiente conjunto de restricciones:

1. Un contenedor c^i no podrá tener otro contenedor c^j de mayor peso sobre él. Como se expresa en la ecuación 5.1. Siendo W la función que obtendrá el peso del contenedor indicado.

$$W(c^i) > W(c^j) \quad \forall \quad c^i, c^j \in b^k \quad (5.1)$$

2. Los contenedores más pesados estarán en la última fila de la bahía y los más ligeros al inicio.
3. η es el limite máximo de apilamiento de contenedores en una bahía.

La heurística de solución para la segunda fase de CPP, acomodar los contenedores en patio, consta de los siguientes pasos:

1. $r^1 = \text{verdadero}$
2. Se recibe el contenedor c^j .
3. Mientras c^j no haya sido ubicado.
 - $b_v^k \Rightarrow$ siguiente bahía disponible en B^k asignado al buque-destino v^i .

- $p^i \Rightarrow$ localizar posición de c^j en b_v^k
 - Si $p^i = \{\emptyset\}$ entonces
 - $p^i \leq c^j$
 - sino
 - $c^i =$ ultimo contenedor en p^i
 - si $(W(c^i) \geq W(c^j) \text{ y } |p^i| < \eta) \parallel r^1$
 - $p^i \leq c^j$
4. Si c^i no ha sido asignado
- si r^1
 - $r^1 =$ falso.
 - Regresar a 3
 - Solicitar ubicación manual.
5. Terminar

Al termino de este proceso, se actualiza la configuración general de patio y del conjunto C^i de contenedores. La evaluación de la calidad de la solución será considerada trabajo futuro debido a restricciones de tiempo en el trabajo de investigación.

5.3. Algoritmo poblacional para CSSP

El segundo modulo del sistema Logistic-CPT consiste dar solución al problema de CSSP. En el modulo anterior se resuelve el acomodo de contenedores en patio, el cual es un ciclo infinito, sin embargo se generan diversos lapsos de tiempo t y cada uno de estos t^i termina cuando arriba el buque a la terminal (el punto de terminación se denomina t_1) y se requiere cargar los contenedores ubicados en el conjunto de bahías b_l^k en el buque v^i .

El CSSP recibe como entrada el estado del buque (después de que han sido realizadas las tareas de descarga de contenedores), los contenedores ubicados en patio para el periodo de tiempo t_1^i y su correspondiente ubicación en el patio de la terminal. Este proceso ocurre cuando la terminal portuaria recibe la confirmación de que el buque v^i esta próximo a arribar.

Por limitaciones en el tiempo requerido para realizar este documento, se deja como trabajo futuro la evaluación de la calidad de solución de la carga del buque. Esta decisión

se apoya en el hecho que la mayoría de las decisiones sobre el ordenamiento de la carga del buque recae sobre la agencia naviera, dejando poco margen de decisión para la aplicación del modelo propuesto en el capítulo 2. A su vez el buque arriba con una carga ya establecida en un puerto anterior generando una complejidad que no ha sido abordada en la literatura especializada. Por cuestiones de simplificación y en base a la información previa del estado del buque, un experto proporcionará los bloques donde deberán ser acomodados los contenedores.

El modelo planteado no evalúa la calidad de la solución sin embargo busca optimizar el tiempo requerido para realizar las tareas de carga del buque v^i . Para realizar dicha evaluación se emplea un algoritmo de colonia de hormigas clásico [SCH].

Algoritmo de colonia de hormigas para cargar los bloques de contenedores en el buque.

1. Generar población inicial P^0
2. Actualizar tabla de feromonas f con P^0
3. Evaluar y ordenar de menor a mayor P^0
4. $S \leq P^0[0]$
5. mientras condición de paro
 - a) generar nueva población P^1
 - b) evaluar y ordenar de menor a mayor P^1
 - c) si $P^1[0] \leq P^0[0]$
 - actualizar f con P^1
 - $S \leq P^1[0]$
 - d) fin si
 - e) $P^0 \leq P^1$
6. fin mientras
7. regresar S

Cada solución generada representa un conjunto de contenedores $P^i = \{c^1, c^2, c^3, \dots, c^{|C^i|}\}$, donde C^i es el conjunto de contenedores ubicados en patio que serán cargados en el buque v^i . Cada uno de los contenedores $c^k \in C^i$ contendrá la sección del bloque del buque donde

sera ubicado. Las posiciones disponibles dentro del bloque del buque se representan en el conjunto $L = \{l_1, l_2, \dots, l_{|L|}\}$, donde cada l_i representa un subconjunto de contenedores almacenados en dicha posición.

En primer lugar se realiza un acomodo de los contenedores por tamaño, garantizando que cada contenedor sea ordenado arriba de otro de mayor o igual tamaño. Se recorren las posiciones dentro del bloque, ordenado éstas de acuerdo a su peso actual, lo que garantiza una mejor distribución de los contenedores entre los bloques con menor carga. Si el contenedor no rompe las restricciones de tamaño (un contenedor no debe tener un contenedor de menor tamaño arriba) y peso (un contenedor no debe tener un contenedor de mayor peso arriba) entonces es ubicado en la parte superior de l_i .

Una solución inicial aleatoria se obtiene mediante la siguiente heurística de acomodo.

1. Ordenar contenedores en C^i por tamaño, de mayor a menor
2. Mientras existan contenedores en C^i
 - $c^k \leq$ seleccionar de forma aleatoria un contenedor en C^i
 - Ordenar L por peso.
 - Desde l_1 hasta $l_{|L|}$ en L
 - Si $\text{tamaño}(l_i) \geq \text{tamaño}(c^i)$
 - $c^t \leq$ ultimo contenedor en l_i
 - si $\text{peso}(c^t) \geq \text{peso}(c^i)$
 - ◇ remove c^k de C^i
 - ◇ $l_i \leq c^k$
 - fin si
 - fin si
 - fin desde
3. fin mientras
4. regresar L

Cada hormiga utilizara la información obtenida mediante la población inicial como punto de partida para seleccionar los contenedores con mayor probabilidad de selección. La forma de asignar los espacios sera la misma para la hormiga y ésta seleccionará contenedor

por contenedor hasta construir una nueva población. Una vez generada una solución se comprueba que cumpla todas las restricciones mediante el siguiente proceso.

Función de evaluación de factibilidad.

1. Desde l_1 hasta $l_{|L|} \in L$
 - Para cada $c \in l_{l-1}$
 - $w_l += \text{peso}(c^k)$
 - si tamaño $c^k \geq c^{k+1}$
 - regresar falso
 - si $w_l \geq$ peso máximo permitido en v^i
 - regresar falso
2. regresar verdadero

El tiempo requerido por la solución generada se mide en base al número de movimientos realizados por las grúas de patio para acceder al contenedor. El tiempo requerido para transportar el contenedor de un punto a otro se considera constante, por lo tanto no es utilizado en este modelo para el calculo del tiempo. En la Figura 5.3 se observa la solución generada por el módulo de CPP.

Fila / Bahía	2	3	4	6
F	6X-621-CT21	6X-631-CT7	6X-642-CT2 , 6X-641-CT84	6X-661-CT21
E	6X-521-CT3	6X-531-CT90		
D	6X-521-CT54	6X-432-CT102, 6X-431- CT12		
C		6X-333-CT34,6X-331-CT32, 6X-331-CT66		
B				
A				

Figura 5.3: Solución generada de CPP

La solución $L = \{c^21, c^7, c^84, c^2, c^21, c^3, c^90, c^54, c^12, c^102, c^32, c^66, c^34\}$ representa una secuencia ordenada de contenedores que serán cargados como se muestra en la Figura 5.4.

Fila / Bahía		6	5	4	2
	I				
F	II			6X-642-CT2	
	I	6X-621-CT21	6X-631-CT7	6X-641-CT84	6X-661-CT21
E	I				
	II				
	I	6X-521-CT3	6X-531-CT90		
D	I				
	II		6X-432-CT102		
	I	6X-521-CT54	6X-431-CT12		
C	I				
	II		6X-333-CT34		
	I		6X-332-CT66		
	I		6X-331-CT32		

Figura 5.4: Solución generada de CPP

Evaluar el tiempo requerido para realizar las operaciones de carga de un buque, requiere conocer la cantidad de movimientos que la grúa de patio requiere realizar, estos movimientos ocurren cuando el siguiente contenedor c^{k+1} se encuentra en una bahía diferente a c^k . Se da un mismo valor a los movimientos de grúa de una bahía a otra al ser este un movimiento de bajo costo de acuerdo a la información proporcionada por [IPM]. Los movimientos de mayor costo son aquellos que requieren obtener un contenedor localizado a bajo de otros. La evaluación de la secuencia de carga de un buque se realiza mediante la siguiente heurística.

- evaluar L
- movimientos=1
- desde c^i hasta $c^{|L|}$ in L hacer
 - si bahía $c^{k-1} \neq$ bahía(c^k)
 - movimientos \leq movimientos + 1
 - movimientos \leq movimientos + (penalización * tamaño(c^k - nivel(c^k)))
- regresar movimientos

La condición de paro para este proceso sera por un limite máximo de iteraciones y el tamaño de la población sera igual a la cantidad de contenedores a ser ubicados en el bloque del buque.

5.4. Algoritmo poblacional para BAP

El tercer modulo utiliza un algoritmo genético simple para dar una solución que permita reducir el tiempo de estancia en cada buque, el algoritmo poblacional genera diversas combinaciones intercalando el orden de atraque de los buques, buscando minimizar de esta forma el tiempo de estancia total requerido por el conjunto de buques V .

Dada una instancia como la Figura 5.5. Una solución S a este problema se representa como una combinación de cada uno de los buques $v^i \in V$. Donde S deberá incluir a todos los buques de V .

Buque	Carga de trabajo	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 5.5: Instancia para BAP.

En el caso de [IPM], la terminal solo cuenta con tres zonas de atraque, usando esto como base, evaluaremos una posible solución $S = \{v^1, v^4, v^7, v^5, v^8, v^2, v^6, v^3\}$. La evaluación de la solución envía la primera terna a QCAP para evaluar $S^1 = \{v^1, v^4, v^7\}$ de donde se obtienen las siguientes instancias (ver Figura 5.6) QCAP, donde le serán asignadas una n cantidad de grúas y su posición inicial para generar una instancia QCSP.

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. En ese punto se registra el tiempo mínimo requerido para atender al buque v^1 y se permitirá el acceso al siguiente buque (v^5) en la lista de candidatos a ingresar a la terminal. El ciclo se repite hasta que todos los buques hallan sido atendidos. Cuando otro

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

Figura 5.6: Primera instancia para $\{v^1, v^4, v^7\}$.

buque complete todas sus tareas el tiempo requerido sera la suma de los tiempos mínimos registrados. El algoritmo genético utilizado para éste problema se detalla a continuación.

Algoritmo genético para BAP

- generar población inicial aleatoria P^0
- mientras condición de paro
- $S \leq$ mejor de P^0
 - generar nueva población P^1
 - si ocurre mutar
 - $i \leq$ individuo aleatorio de P^1
 - mutar(i)
 - si mejor de $P^1 < S$
 - $S \leq$ mejor de P^1
 - fin si
 - $P^0 \leq P^1$

Una solución completa del BAP se ilustra en la Figura 5.7.

Las operaciones de cruce se realizaran mediante un torneo simple, seleccionando los dos mejores candidatos para generar un nuevo individuo. La mutación se realizara mediante un intercambio aleatorio, donde serán seleccionados dos buques de un mismo individuo y sus posiciones serán intercambiadas.

Secuencia de Buques atracados	Tiempo requerido para terminar	Tiempo de terminación mínimo	Buques en espera de ser atendidos
{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 5.7: Solución al problema BAP

5.5. Modelo de solución para el QCAP

Las grúas de muelle son un recurso limitado en las terminales portuarias, y solo se pueden despachar pocos buques en el puerto al mismo tiempo. Realizar un análisis exhaustivo para este problema requiere un tiempo de cómputo muy grande debido a la cantidad de combinaciones posibles que pueden ser generadas. Una forma de solucionar este problema consiste en agrupar todos los buques ubicados en el muelle y unificar sus tareas en una sola instancia para el QCSP. De esta forma mediante un algoritmo heurístico poblacional, se obtiene la combinación mínima requerida de grúas para realizar todas las operaciones en buque en el menor tiempo posible.

5.5.1. Algoritmo genético para el QCAP

El cuarto modulo de Logistic-CPT consiste en asignar una cantidad n de grúas para cada buque ubicado en los muelles de la terminal. La literatura especializada no asigna una posición inicial de las grúas de patio en este paso, sin embargo debido a un análisis realizado a las instancias de QCSP, este proceso se asigna a este módulo para reducir la complejidad del siguiente módulo. En este documento se propone el siguiente algoritmo genético para resolver el problema de QCAP.

- Generar una población inicial P^0 .
- Evaluar P^0 .
- $S \leq$ mejor solución en P^0

- Mientras no se alcance la función de paro
 - Producir nueva generación P^1
 - Si S mayor que mejor solución en P^1
 - $S \leq$ mejor solución en P^1
 - fin si
- fin mientras
- Regresar S .

Una solución QCAP se representa mediante un arreglo binario, donde cada valor "1" representa una grúa asignada en la posición ocupada y "0" indica que dicha bahía o posición estará vacía. Cada espacio de la solución representa una bahía del o de los buques que serán atendidos. La Figura 5.8 representa un modelo de solución a este problema; donde se muestra una configuración de carga de diez bahías que será atendida con tres grúas de muelle.

Bahías								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	1	0	0	0	1	0
Grúas a utilizar								

Figura 5.8: Solución generada de CPP

Las operaciones de cruce se realizarán mediante un torneo simple y la mutación se realizará desplazando una grúa de su posición actual a una bahía continua factible (que no incumpla las restricciones de seguridad sobre la distancia mínima entre las grúas de muelle).

Todas las soluciones encontradas son evaluadas mediante el algoritmo propuesto para el QCSP, garantizando de esta forma que se evalué la mejor solución con el menor tiempo posible.

5.6. Modelo de solución para el QCSP

El quinto módulo de Logistic-CPT evaluará el tiempo requerido para realizar las operaciones de carga y descarga de contenedores en el buque. Éste es el módulo más importante

del sistema. QCSP recibe una instancia como la Figura 5.9, a modo de entrada de datos, mediante esta información determina la secuencia de carga que requiera el menor tiempo posible para realizar todas las tareas.

Tarea	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tiempo requerido	10	5	5	3	6	10	8	4	10	7
Ubicación	1	3	3	3	5	1	3	3	5	7
Restricciones	$\Phi = \langle \{6,1\}, \{7,8\}, \{8,4\}, \{3,2\}, \{9,5\} \rangle$, $\psi = \langle \emptyset \rangle$. $K = 2$ $= 1, = 7$									

Figura 5.9: Instancia de entrada para el QCSP.

La instancia cuenta con diez tareas y se requiere realizar cada una de ellas. Cada grúa puede seleccionar una tarea a la vez. Cuando son seleccionadas todas las tareas se genera una secuencia de solución. Existe un paralelismo en la realización de tareas al seleccionar cada grúa una tarea en un tiempo determinado. Por ejemplo, la grúa uno puede seleccionar las tareas, 1, 2, 3, 4 y 5 mientras la dos seleccionara el resto, 6, 7, 8, 9 y 10. Generando la siguiente secuencia.

$$k^1 = 1, 2, 3, 4, 5$$

$$k^2 = 6, 7, 8, 9, 10$$

Al unir los dos grupos se obtiene la secuencia de trabajo $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$, la cual aun cuando no es factible si es una de las posibles soluciones posibles a generar. Las n tareas a realizar generan n factorial combinaciones posibles de solución, para instancia de la Figura 5.9 existen 3, 628, 800 combinaciones probables, de las cuales solo unas pocas son factibles.

Kim y Park proponen un método Branch and Bound que permita generar soluciones factibles limitando la cantidad de tareas seleccionables para cada grúa de acuerdo a la posición actual que se localicen y que no violenten ninguna de las restricciones planteadas en su modelo.

Con la instancia de la Figura 5.9 la grúa k^1 podrá elegir entre la tarea 6, 7, 9 o 10 las cuales cumplen con algunas restricciones del modelo. Sin embargo la tarea 10 rompe las restricciones de la posición de las grúas al estar ubicada en la misma bahía que la grúa k^2 por tal motivo, no podrá ser considerada. Mediante este sencillo método la grúa k^1 seleccionara de forma aleatoria una tarea del conjunto $\{6, 7, 9\}$. Al seleccionar dicha

tarea actualizará su posición actual lo que cambiara las tareas disponibles para las demás grúas.

La forma para seleccionar las tareas de las grúas se realiza de la siguiente forma. Todas las grúas seleccionaran una tarea inicial del conjunto de soluciones posibles, la cual no rompa con las restricciones. Una vez que todas las grúas tienen o cuentan con la tarea inicial posible, se busca la grúa con el menor tiempo de terminación. A dicha grúa se le asigna una nueva tarea factible y se le resta el tiempo de la misma a las demás tareas pendientes de completación. El proceso continúa hasta que todas las tareas han sido asignadas. La solución generada indicara las operaciones que realizara cada grúa.

Una solución factible al ejemplo anterior quedaría de la siguiente forma:

$$k^1 = \{6, 1, 7, 8, 4, 3, 2\}$$

$$k^2 = \{9, 5, 10\}$$

El tiempo requerido para realizar el total de las tareas, es el máximo de la suma de los mínimos generados en la solución. En nuestro ejemplo para la solución generada se requieren 47 unidades de tiempo. A pesar de reducir el número de tareas que pueden realizar las grúas existe un amplio número de secuencias posibles, dentro de las cuales, en experimentos recientes se ha logrado demostrar que existen también diversas soluciones óptimas.

5.6.1. Algoritmo metaheurístico híbrido para el QCSP.

Para poder realizar una implementación de este modelo utilizando el sistema de colonia de hormigas (SCH) 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 Branch and Bound explora un árbol de soluciones desde la raíz 0, hacia los nodos en los niveles superiores donde:

- La profundidad del árbol es el número de tareas
- Un nodo en el nivel i del árbol de soluciones corresponde a una solución parcial que consiste de la 1^o 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 $\{S_k\} 1 \leq k \leq |K|$

5.6.2. Algoritmo Branch and Bound

El algoritmo realiza un recorrido por profundidad de todas las combinaciones posibles de tareas que pueden realizar las grúas de forma simultánea y consta de los siguientes pasos.

- Iniciar
- Seleccionamos la siguiente rama del nodo hasta encontrar una solución factible, se realiza una primera búsqueda por profundidad.
- Seleccionamos el nodo con el menor valor entre los nuevos nodos de la rama
- Continuamos la búsqueda por profundidad hasta encontrar la primera solución factible.
- Seleccionamos la siguiente solución después de encontrar la primera solución.
- Después de hacer una búsqueda por profundidad, todos los nodos con soluciones parciales serán soluciones candidatas para la siguiente solución
- La selección será igual, buscando el mínimo.
- Crear soluciones factibles desde la rama del nodo
 - 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.

- Mientras tanto: Tareas que violen la restricción (8) que evaluar la precedencia o interfieran entre las QCs (restricciones (10) y (11) son eliminadas).
- Eliminar los nodos “dominados”.
 - 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 c^k 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.
- 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 (l_k^c, l_{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_i^k 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 como:

$$Lowerboundl = \max \max \{c_k, b_m\} \quad (5.2)$$

donde:

$$b_m = \frac{1}{K} \left\{ \sum_{k \in C} c_k + \sum_{i \in U} p_i + QC_{travel} \right\} \quad (5.3)$$

$$QC_{viaje} = t_i + t_b + t_r \quad (5.4)$$

$$t_i = \max_{j \in U} \{l_j - l_K^c, 0\} \quad (5.5)$$

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

Sea $(l_k^c, l_k^c + 1)$ 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.

$$t_b = \sum_{k=1}^{K-1} u_k \quad (5.6)$$

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 ente cada QC_k y $k + 1$ por lo tanto $(t_l + t_r + t_b)$ es igual al límite inferior de viaje para completar todas las tareas restantes entre la QC_k y QC_{k+1} .

De esta forma:

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 5.2 es el límite inferior en el valor de la función objetivo.

$$LB2 = LB1 \quad (5.7)$$

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 (l_k^c, l_{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:

$$QC_{viaje} = \sum_{k=1}^K t_k \quad (5.8)$$

Donde

$$t_k = \max\{(l_k^c - l_{kl}), (l_{kr} - l_k^c)\} + 2 \min\{(l_k^c - l_{kl}), (l_{kr} - l_k^c)\} \quad (5.9)$$

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:

$l_k^c \sim l_{kl} \leq l_{kr} \sim l_k^c$, 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 $(l_{kr} \sim l_k^c) + 2(l_k^c \sim l_{kl})$. Cuando $l_k^c \sim l_{kl} > l_{kr} \sim l_k^c$, el tiempo de viaje de QC_k sera $(l_k^c \sim l_{kl}) + 2(l_{kr} \sim l_k^c)$.

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.

- Detener la búsqueda cuando no queden más nodos con soluciones parciales.
- 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.

5.6.3. Algoritmo GRASP

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 . 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. Este conjunto de operaciones se denota como F . 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.

$$\frac{1}{|l_j^c - l_j|} < r \max_{l \in F} \left\{ \frac{1}{|l_i^c - l_i|} \right\} \quad (5.10)$$

En donde r es una constante entre 0 y 1.

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

$$\frac{\left(\frac{1}{|l_j^c - l_j|}\right)}{\sum_{l \in F} \left(\frac{1}{|l_i^c - l_j|}\right)} \quad (5.11)$$

Seleccionamos al azar la tarea $j \in F$ basándonos en la distribución de probabilidad 5.11

Repetimos 1 – 5 hasta que todas las tareas sean asignadas.

De acuerdo con 5.10 y 5.11 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 5.11.

Mejorando la fase 2

1. Paso 0: $i = 0$
2. Paso 1: $i = i + 1$
 - Si $i > k$ detener
 - Si no Seleccionamos QC_i e ir a 2
3. 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.
 - 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.
 - Si la mejora es positiva realizamos el intercambio
 - Repetimos el paso hasta que no haya más mejoras posibles.
 - Si no hay mejoras posibles ir a 1

Criterios de paro de GRASP.

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.

5.7. Algoritmo metaheurístico basado en GRASP y SCH para el QCSP.

La primera colonia de hormigas será generada utilizando un algoritmo GRASP.

Construcción de la Colonia

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.

Generación de la tabla de feromonas y parámetros del SCH

La tabla de feromonas tendrá un tamaño de n por q y una tercera dimensión de tamaño n . Este tamaño permite validar todos los movimientos posibles por las hormigas. Se utilizaron los parámetros estándar de SCH, tanto de evaporación como de exploración y explotación.

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 feromonas de la colonia de hormigas se genera utilizando la primera generación de soluciones generada mediante GRASP. Dicha tabla permitirá a cada una de las hormigas seleccionar una tarea del conjunto de soluciones posibles, seleccionando aquella que tenga un valor mayor en la tabla.

La tabla de feromonas 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 se da por terminado el proceso.

Capítulo 6

Experimentacion y Resultados

El sistema Logistic-CTP consiste de cinco módulos, cada uno representa un módulo de solución planteado en el Capítulo 5 de éste documento. El primer módulo en ser invocado, es el que da solución al problema de CPP, consiste de una heurística simple que genera resultados de la misma forma como el personal especializado en [IPM], el resultado de este proceso genera los datos que pasaran a ser parte de la información necesaria para generar las instancias del tercer modulo, la calidad de los resultados obtenidos en este paso no son evaluados en esta versión del sistema.

El segundo modulo ofrece una solución heurística al problema de carga del buque, basada en los modelos utilizados en puerto, este proceso evaluá la calidad de la solución en base a los movimientos realizados en patio generando soluciones mediante el sistema clásico de colonias de hormigas, este modelo no interactua con los demás modelos por lo que su funcionamiento es independiente igual que el primer modulo.

El tercer módulo da solución al problema BAP, en este punto se requiere información sobre la cantidad de buques en espera que sera proporcionada por personal de IPM, estos datos generan una instancia cuya evaluación de la solución será evaluada en base al tiempo requerido para dicha configuración interactuando directamente con el modulo cuatro.

El cuarto modulo determina una solución para el problema del QCAP, utiliza un algoritmo genético clásico para determinar la cantidad necesaria de grúas y su posición inicial esta solución requiere conocer las cantidad de grúas disponibles para ese periodo de tiempo, mediante la generación de soluciones interactuará con el quinto modulo del sistema solicitando a este evalué el tiempo requerido para realizar dicha configuración. Los módulos tres y cuatro dependen de la calidad del quinto modulo para ser evaluadas sus soluciones candidatas.

El ultimo modulo es el principal, este se resuelve mediante un algoritmo metaheurístico poblacional basado en una hibridacion del sistema de hormigas tradicional (Ant Colony System, cuyas siglas en inglés son ACS) y el algoritmo de búsqueda aleatoria voraz adaptativa (Greedy Randomized Adaptative Search, cuyas siglas en inglés son GRASP). La combinación de ambos métodos generan el algoritmo HACS-GRASP.

6.1. Resultados heurística CPP

El problema de CPP se aborda en dos partes, permitiendo modelar la aleatoriedad del mismo en una y atendiendo la capacidad de la terminal para almacenar temporalmente los conjuntos de contenedores en la otra. Para realizar esta experimentación se generó un conjunto de 10 instancias. Cada instancia representa mil contenedores de los cuales, el 40 % (400 contenedores) son contenedores de 40 pies y el resto contenedores de 20 pies (600 contenedores), los porcentajes se obtuvieron en base a información recopilada durante las entrevistas de trabajo realizadas a personal de IPM.

Las instancias generadas respetan la regla del primer porcentaje (40 %) de contenedores de 40 pies y la segunda parte (20 %) contenedores de 20 pies. El peso de los contenedores se asigna de acuerdo a su numeración por conjunto, donde el primer 20 % de los contenedores de cada junto tiene un peso super pesado, el 20 % siguiente consistirá de contenedores pesados, el siguiente 40 % serán contenedores de peso medio y el resto serán contenedores ligeros.

Cada una de las instancias generadas representa un conjunto de 10 buques a ser atendidos en un periodo de tiempo determinado. En la Figura 6.1 cada fila ilustra la cantidad de contenedores por instancia y el número de instancia correspondiente, las columnas indican el buque de cada conjunto que se espera recibir. Por razones de simplificación se considera que arribarán todos los contenedores esperados.

El algoritmo heurístico recibe como entrada la configuración inicial del patio como se muestra en la Figura 6.2. El espacio definido para asignar los contenedores cuenta con cuatro zonas, cada una de ellas con un conjunto de cuarenta bahías y un nivel de apilamiento de tres contenedores. Este espacio genera la capacidad para atender un total 2880 contenedores de 20 pies. El propósito de la experimentación es reproducir el proceso de acomodo en IPM para identificar posibles áreas de investigación en futuros proyectos y al mismo tiempo automatizar el proceso mediante la abstracción de la información recopilada en éstos heurísticos.

	v^1	v^2	v^3	v^4	v^5	v^6
1	131	190	8	69	8	2
2	195	94	99	5	106	103
3	131	69	162	3	129	200
4	200	200	130	82	97	70
5	23	111	200	88	12	70
6	180	131	200	20	22	30
7	51	38	148	10	200	52
8	183	70	16	111	200	130
9	200	130	184	30	147	16
10	70	130	58	154	13	200

Figura 6.1: Conjunto de instancias CPP distribuidas por buque

Fila/Bahía	1-10	11-20	21-30	31-40	Fila/Bahía	1-10	11-20	21-30	31-40
A	ZONA A				A	ZONA B			
B					B				
C					C				
D					D				
E					E				
F					F				
Fila/Bahía	1-10	11-20	21-30	31-40	Fila/Bahía	1-10	11-20	21-30	31-40
A	ZONA C				A	ZONA D			
B					B				
C					C				
D					D				
E					E				
F					F				

Figura 6.2: Configuración inicial del patio de la terminal

Los resultados obtenidos por la primera fase, asignación de bahías para cada instancia, se detallan en la Tabla 6.1. Éstos valores representan la cantidad mínima de bahías, de tamaño 20, requeridas para cada conjunto de contenedores, tomando en cuenta las restricciones presentadas en la metodología de solución para el CPP.

La distribución final de los contenedores se detalla en Tabla 6.2. Se invocan los contenedores de forma aleatoria para realizar el llenado de las bahías, al contar con espacio disponible el número de bahías se incrementa en algunos casos para cumplir con las restricciones de ordenamiento por peso. Éste comportamiento es esperado porque minimiza los movimientos requeridos por las grúas para obtener un contenedor deseado, minimizando la complejidad para transportarlos al buque, este es un objetivo secundario del CPP que pierde fuerza cuando la cantidad de espacios disponibles no es la adecuada.

Distribuir los contenedores de ésta forma optimiza el uso de las bahías dentro del patio de la terminal al utilizar el espacio disponible para minimizar la complejidad del apilamiento de los contenedores. Los resultados obtenidos automatizan la asignación de espacios dentro de la terminal, dejando como trabajo futuro la toma de decisiones cuando

Tabla 6.1: Bahias requeridas por buque

Instancia/Buque	v^1	v^2	v^3	v^4	v^5	v^6	v^7	v^8	v^9	v^{10}	Total
1	11	15	3	6	3	3	16	15	8	8	88
2	16	8	8	3	9	9	8	6	8	11	86
3	11	6	13	3	11	16	6	16	3	3	88
4	16	16	11	7	8	6	3	15	3	3	88
5	3	9	16	7	3	6	10	16	7	7	84
6	14	11	16	2	3	3	16	13	4	3	85
7	4	3	12	3	16	5	8	3	16	15	85
8	15	6	3	9	16	11	16	3	3	6	88
9	16	11	15	3	12	3	3	3	5	16	87
10	6	11	5	12	3	16	3	11	12	5	84

Tabla 6.2: Distribución de los contenedores en patio

Instancia/Buque	v^1	v^2	v^3	v^4	v^5	v^6	v^7	v^8	v^9	v^{10}	Total
1	14	18	3	6	3	3	20	17	9	8	101
2	19	10	8	3	11	11	13	7	10	15	107
3	12	8	15	3	12	18	6	19	3	3	99
4	20	18	12	10	8	8	3	22	3	3	107
5	4	12	19	11	3	6	15	20	9	9	108
6	18	17	19	2	3	3	22	14	8	3	109
7	6	3	19	3	15	11	13	3	17	19	109
8	16	8	3	10	18	12	18	3	3	8	99
9	17	12	18	3	14	3	3	3	6	19	98
10	7	15	7	13	3	19	3	12	12	6	97

no existan espacios suficientes para almacenar los contenedores que se espera arriben y añadir la complejidad generada al incluir ventanas de tiempo.

6.2. Resultados algoritmo poblacional para el CSSP

El CSSP requiere para su funcionamiento asignar espacios de un tamaño determinado por bahías y niveles para cada conjunto de contenedores que serán cargados en buque. A modo de simplificación se considera que estos espacios se asignan de forma ordenada para cada conjunto, es decir, el primero conjunto tendrá un espacio en la parte inferior del buque y los espacios posteriores estarán localizados en los siguientes espacios continuos o superiores del buque. Para este experimento se considera que el buque consta solamente de dos niveles, siendo la parte superior la localizada en la cubierta del buque, ubicándose

arriba de las tapas, de tal forma que no se sumara para las restricciones de peso de cada pila de contenedores.

Mediante estas simplificaciones en la complejidad de la instancia, sólo será necesario evaluar la complejidad de cada bloque de forma individual, evaluando únicamente el tiempo requerido para cargar cada uno de los bloques. Para realizar el experimento se utilizaron los resultados obtenidos por CPP, para ser asignados a un conjunto de 10 buques. Cada buque consta de 10 bloques donde serán cargados los contenedores teniendo como objetivo principal minimizar el tiempo requerido para cargar cada uno de los bloques.

Para cada uno de los bloques dados se generaron n individuos de acuerdo a la cantidad de contenedores de cada conjunto. Se crearon 100 generaciones por cada bloque y el mejor resultado obtenido en base a tiempo es el que se retorna. El tiempo total para cargar los contenedores en el buque se obtiene mediante el promedio de los tiempos requeridos de los bloques.

En la Tabla 6.3 se detallan los tiempo requeridos para cargar cada uno de los bloques en el buque, las filas indican el número de instancia y las columnas el tiempo requerido para cargar cada bloque de buque. La última columna indica el promedio requerido para realizar la carga del buque. Los promedios en los tiempos son redondeados a su entero superior para evitar óptimos locales con diferencias no significativas.

Tabla 6.3: Tiempo requerido por cada bloque

Buque/Bloque	v_1^i	v_2^i	v_3^i	v_4^i	v_5^i	v_6^i	v_7^i	v_8^i	v_9^i	v_{10}^i	Promedio
1	176	240	32	96	32	32	256	240	128	128	136
2	256	128	128	32	144	144	128	96	128	176	136
3	176	96	208	32	176	256	96	256	32	48	138
4	256	256	176	112	128	96	32	240	32	32	136
5	32	144	256	112	32	96	160	256	112	112	132
6	224	176	256	32	32	48	256	208	64	32	133
7	64	48	192	32	256	80	128	32	256	240	133
8	240	96	32	144	256	176	256	32	32	96	136
9	256	176	240	48	192	32	32	48	80	256	136
10	96	176	80	192	32	256	48	176	192	80	133

En los promedios obtenidos no se observaron discrepancias aun cuando se realizaron diversas instancias con diversos tamaños de conjuntos de contenedores, cabe hacer mención que asignar el tamaño de cada bloque es un proceso realizado por personal especializado y este proceso tiene una gran influencia en el tiempo de carga de cada bloque, con estos

tiempos por bloque se genera el primer conjunto de información para las instancias QCSP y QCAP. El cual se utilizará al momento de evaluar el tiempo total de carga del buque.

6.3. Resultados algoritmo genético para el BAP

El BAP tiene que localizar la secuencia de atraque óptima para un conjunto de buques. Para realizar la experimentación se generaron 10 instancias, cada una con un conjunto de 10 buques a ser atendidos. Las instancias se muestran en la Tabla 6.5, cada uno de los valores de los buques representa la cantidad de tareas de carga y descarga que deben ser realizadas para que éste pueda partir. En el Anexo B, se detallan los tiempos requeridos por cada tarea.

Tabla 6.4: Instancias utilizadas para el BAP

Instancia/Buque	v^1	v^2	v^3	v^4	v^5	v^6	v^7	v^8	v^9	v^{10}
1	10	15	20	25	30	40	40	50	50	100
2	15	15	15	25	30	40	45	50	50	80
3	15	15	20	20	35	35	40	80	80	80
4	10	10	15	15	15	30	30	40	40	40
5	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
6	10	15	15	15	15	20	20	20	20	20
7	10	15	20	25	30	35	40	55	55	5
8	15	25	35	45	50	55	70	75	100	100
9	10	15	35	35	40	40	60	60	80	80
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

El módulo requiere ser evaluado por los algoritmos de QCAP y QCSP, al término de esta evaluación se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla ???. El algoritmo se ejecutó con una condición de paro de 10 generaciones, cada una con un total de 10 individuos. La probabilidad de mutación $q = 0,01$ y la probabilidad de cruce $c = 0,8$. La secuencia representa el orden en que ingresarán los buques a la terminal, en la cual se configura con tres muelles para aumentar la complejidad de la instancia y verificar que los resultados son válidos, en la vida real IPM solo cuenta con dos muelles.

6.4. Resultados algoritmo genético para el QCAP

El módulo de solución para QCAP se conforma de un algoritmo genético simple, que recibe como parámetros la cantidad de bahías totales que serán atendidas por una cantidad

Tabla 6.5: Mejores soluciones por instancia

Instancia	Mejor secuencia encontrada									
1	v^4	v^3	v^{10}	v^7	v^1	v^6	v^2	v^9	v^8	v^5
2	v^{10}	v^1	v^3	v^2	v^5	v^4	v^7	v^9	v^8	v^6
3	v^8	v^6	v^3	v^2	v^{10}	v^1	v^9	v^7	v^4	v^5
4	v^{10}	v^5	v^2	v^1	v^7	v^3	v^4	v^6	v^8	v^9
5	v^1	v^3	v^2	v^4	v^8	v^5	v^6	v^7	v^9	v^{10}
6	v^1	v^{10}	v^2	v^8	v^5	v^4	v^6	v^3	v^7	v^9
7	v^8	v^3	v^7	v^9	v^6	v^5	v^1	v^{10}	v^4	v^2
8	v^6	v^9	v^{10}	v^1	v^5	v^7	v^2	v^8	v^3	v^4
9	v^9	v^7	v^6	v^2	v^8	v^{10}	v^1	v^5	v^3	v^4
10	v^3	v^6	v^8	v^{10}	v^4	v^1	v^5	v^7	v^9	v^2

n de grúas de muelle. La experimentación se realiza en conjunto con el módulo BAP, pero por razones de espacio en la presentación de resultados, se ejecuta de forma independiente con un conjunto de 10 instancias con 10 bahías por instancia. El conjunto de instancias para evaluar este algoritmo se muestra en la Tabla 6.6, cada uno de los valores de las bahías representa la cantidad de tareas que deben realizarse en éstas. Se configuro para un máximo de cuatro grúas de muelle.

Tabla 6.6: Tareas por bahía en las instancias

Instancia/Bahía	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	11	15	3	6	3	3	16	15	8	8
2	16	8	8	3	9	9	8	6	8	11
3	11	6	13	3	11	16	6	16	3	3
4	16	16	11	7	8	6	3	15	3	3
5	3	9	16	7	3	6	10	16	7	7
6	14	11	16	2	3	3	16	13	4	3
7	4	3	12	3	16	5	8	3	16	15
8	15	6	3	9	16	11	16	3	3	6
9	16	11	15	3	12	3	3	3	5	16
10	6	11	5	12	3	16	3	11	12	5

Estos valores se conforman una instancia QCSP y se enviá como parámetro la posición inicial de cada una de las grúas de muelle. Se considera la mejor combinación la que requiere el menor tiempo de ejecución de todas las tareas. La Tabla 6.7 muestra las mejores combinaciones obtenidas, en todas ellas la mejor cantidad de grúas de muelle a utilizar fue de 3. Cada número uno representa la bahía donde sera ubicada la grúa al inicio de las operaciones, se indica con cero las bahías donde las grúas realizaran tareas posteriores al punto de inicio. La principal razón de utilizar un conjunto de bahías reducido a 10 es

para ilustrar que la complejidad del QCSP no depende de la cantidad de grúas empleadas sino de la distribución de la carga en las bahías.

Tabla 6.7: Mejores combinaciones de grúas por instancia

Instancia	Combinación									
1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
3	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
5	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0
6	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
7	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0
8	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
9	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
10	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0

Estos resultados utilizan una restricción de una bahía como espacio de seguridad mínimo entre las grúas de muelle. En ninguna instancia fue necesario utilizar el límite máximo de grúas permitido debido a estas restricciones.

6.5. Resultados HACS-GRASP para el QCSP

[Meisel 2010] propone un software para generar instancias en base a las características principales del QCSP, este programa desarrollado en Java permite a los investigadores reproducir o generar conjuntos de datos para realizar experimentos que permitan evaluar o comparar los resultados obtenidos por otros investigadores o en su defecto presentar los datos propios. Al estar desarrollado en Java garantiza que pueda ser ejecutado en cualquier sistema operativo soportado por dicha plataforma; lo que le otorga portabilidad al programa.

El QSCPgen recibe como entrada un conjunto de datos mostrados en la Tabla 6.8. En base a esta información el programa genera una única instancia de QCSP en un formato de texto plano. El algoritmo HACS-GRASP se configuró con 100 colonias (en cada una se genera una hormiga por cada tarea), la tasa de evaporación es $T^0 = 0.00009$ y el porcentaje de exploración/explotación $q = 0,65$; para su evaluación, el algoritmo es ejecutado con un tiempo límite de 360 segundos por instancia, utilizando el conjunto de instancias propuestas por Meisel [Meisel 2010].

Haciendo uso del programa QCSPgen presentado por Meisel [Meisel 2010], se generó cada una de las siguientes combinaciones presentada en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8: Combinaciones utilizadas para generar el conjunto de instancias

Set	n	b	c	f	Loc	d	q	s	#inst
A	[10, 15, ..., 40]	10	200	0.5	uni	1	2	1	70
B	[45, 50, ..., 70]	15	400	0.5	uni	1	2	1	60
C	[75, 80, ..., 100]	20	600	0.5	[cl 1, cl 2, uni]	1	4	1	60
D	50	15	400	[0,2,0,8]	uni	1	6	1	60
E	50	15	400	0.5	uni	[0.80,0.85,...,1]	4	1	50
F	50	15	400	0.5	uni	1	[2,3,...,6]	1	50
G	50	15	400	0.5	uni	1	4	[0,1,...,4]	50

Los resultados obtenidos de este experimento se detallan en el Anexo C, la siguiente Tabla 6.9 es un resumen de los resultados obtenidos por cada grupo de instancias, donde se muestra que HACS-GRASP presenta una mejora en los tiempos de ejecución respecto al algoritmo de Meisel [Meisel 2009], que es el mejor del estado del arte.

6.6. Pruebas estadísticas

Utilizando el sistema [SAS 2009] se realizó la prueba de Wilcoxon. Los resultados están ilustrados en la Tabla 6.10 y demuestran que no existen diferencias significativas en el desempeño de los algoritmos. Para un nivel de significancia $\alpha=0.05$, dado que $p\text{-value}=0.0601$ es mayor que α , entonces no se rechaza la hipótesis nula que establece que el desempeño medio de ambos algoritmos es igual estadísticamente.

Aunque el análisis estadístico reveló que los algoritmos evaluados son similares en calidad, el algoritmo propuesto solo emplea el 8% del tiempo reportado en [Meisel 2010], ajustándose mejor a los requerimientos de entornos reales. Los tiempos de ejecución planteados permiten a las aplicaciones de entornos reales obtener soluciones de buena calidad en un tiempo significativamente rápido. Permitiendo a los tomadores de decisión evaluar diferentes opciones para la asignación de recursos a cada uno de los buques que van a ser atendidos

El tiempo de ejecución es un factor importante para la evaluación general del sistema, ya que, los demás algoritmos utilizan como forma de evaluación el tiempo total requerido para cargar el buque, al ser este el factor cuyo impacto es mayor en los costos de todo el proceso de logística de contenedores.

El algoritmo HACS-GRASP propuesto en este documento es el modulo principal de

Tabla 6.9: Comparativa de resultados obtenidos

(a) Resultados grupo A

Grupo	HACS-GRASP		Meisel B&B	
	Resultado	Tiempo	Resultado	Tiempo
A1	5225	360	5164	1
A2	5117	360	5099	1
A3	5137	360	5081	1
A4	5144	360	5070	1
A5	5151	360	5068	1
A6	5181	360	5071	1
A7	5199	360	5063	1

(b) Resultados grupo B

Grupo	HACS-GRASP		Meisel B&B	
	Resultado	Tiempo	Resultado	Tiempo
B1	8361	360	7758	713
B2	8372	360	7709	1,251
B3	8633	360	7719	1,078
B4	8247	360	7711	1,317
B5	8335	360	7690	2,118
B6	8360	360	7621	2,231

(c) Resultados grupo C

Grupo	HACS-GRASP		Meisel B&B	
	Resultado	Tiempo	Resultado	Tiempo
C1	12202	360	11429	3,600+
C2	12156	360	11204	3,248
C3	12130	360	10847	3,600+
C4	11933	360	10689	3,600+
C5	11804	360	10833	3,600+
C6	11853	360	10865	3,600+

(d) Resultados grupo D

Grupo	HACS-GRASP		Meisel B&B	
	Resultado	Tiempo	Resultado	Tiempo
D1	5001	360	4750	3,240
D2	3956	360	3676	2,212
D3	3773	360	3495	2,100
D4	12806	360	12137	7
D5	12954	360	12091	508
D6	12870	360	12090	430

(e) Resultados grupo E

Grupo	HACS-GRASP		Meisel B&B	
	Resultado	Tiempo	Resultado	Tiempo
E1	8352	360	7690	3,306
E2	8371	360	7693	1,958
E3	8307	360	7697	870
E4	8332	360	7697	481
E5	8386	360	7709	41

(f) Resultados grupo F

Grupo	HACS-GRASP		Meisel B&B	
	Resultado	Tiempo	Resultado	Tiempo
F1	15316	360	15097	11
F2	10422	360	10084	199
F3	8387	360	7709	1248
F4	7624	360	7373	2892
F5	7487	360	7361	3600+

(g) Resultados grupo G

Grupo	HACS-GRASP		Meisel B&B	
	Resultado	Tiempo	Resultado	Tiempo
G1	8092	360	7584	2,440
G2	8297	360	7709	1,248
G3	10118	360	9954	3,252
G4	12549	360	12399	3,600+
G5	14275	360	14054	3,600+

Tabla 6.10: Resultados de la prueba de Wilcoxon

Prueba de Wilcoxon	
Estadístico	1782
Aproximación Normal	
Z	1.5541
Primer lado $Pr > Z$	0.0601
Segundo lado $Pr > Z $	0.1202
Aproximación t	
Primer lado $Pr > Z$	0.0621
Segundo lado $Pr > Z $	0.1241

todo el sistema Logistic-CTP. Fue implementado en C# de Visual Studio 2010 para poder ser anidado como un modulo del sistema CTMS desarrollado por Fortia.

Capítulo 7

Conclusiones y trabajo futuro

En éste capítulo se presentan las conclusiones del trabajo de investigación así como el trabajo futuro que requiere el modelo. Las observaciones y resultados finales obtenidos como producto de la investigación desarrollada en [IPM] y literatura especializada.

7.1. Conclusiones

Durante el desarrollo de este documento se presento un modelo de solución para los problemas que involucra la logística de contenedores para una terminal portuaria. Como producto de ésta investigación se creó el modelo Logistic-CPT consistente de cinco módulos principales que trabajan de forma conjunta para dar solución a los problemas generados.

Se incorporaron algoritmos metaheurísticos al modelo Logistic-CPT. Mediante ésta incorporación se genera un sistema integral que aborda de manera diferenciada los problemas de optimización involucrados en la logística de contenedores posibilitando obtener soluciones que superan a la solución manual y son competitivos con los reportes del estado del arte. Las soluciones son generadas en un tiempo inferior al requerido por el personal especializado, cumpliendo la hipótesis principal propuesta en este documento.

Particularmente, se dio mayor importancia a los problemas que tienen un impacto significativo en el tiempo requerido para realizar las operaciones de traslado y carga de contenedores. El principal problema abordado es el QCSP, el cual determina el tiempo requerido para realizar las operaciones de carga y descarga del buque.

La validación de los resultados obtenidos por QCSP se realizo mediante una comparativa con el mejor del estado del arte, si bien no se logro una mejora significativa en los resultados, se logró mejorar el tiempo requerido por los algoritmos para generar una

solución. Los resultados obtenidos son estadísticamente similares a los mejores obtenidos en la literatura.

Los módulos para dar solución al BAP y QCAP dependen directamente del módulo QCSP, al utilizarlo para medir la calidad de las soluciones generadas. Al ser QCSP un módulo competitivo se garantiza obtener una buena solución que minimice el tiempo requerido por ambos módulos. Los problemas de CPP y CSSP se automatizaron parcialmente debido a la complejidad en la temporalidad de cada modelo, esta automatización parcial reduce el tiempo requerido para generar soluciones y garantiza una buena calidad de las mismas.

7.2. Aportaciones

Las principales aportaciones de éste documento de tesis fueron:

- Generar un modelo que permite abstraer la complejidad temporal de la logística de contenedores.
- Se realizó un estudio importante sobre el funcionamiento de la terminal portuaria y una comparativa con respecto al estado del arte, identificando cada uno de los problemas principales involucrados.
- Se generaron algoritmos metaheurísticos que permiten generar soluciones de forma conjunta o individual a los diversos problemas localizados
- El módulo principal que da solución al QCSP mejora el tiempo requerido para obtener una buena solución en un 80 %.
- El sistema generado en base al modelo Logistic-CPT sirve de base para futuros proyectos que mejoren el desempeño de los problemas presentados
- El modelo Logistic-CPT permite identificar la interacción entre los problemas y define la forma como influye una solución a un problema sobre la complejidad de los demás.

El modelo Logistic-CPT y la herramienta generada reducen los costos de operación de los procesos al minimizar los tiempos requeridos para atender los buques buque confirmando las hipótesis planteadas y dando puntual cumplimiento a los objetivos planteados.

7.3. Trabajo futuro

En base a la investigación realizada y las acotaciones realizadas por las limitaciones de tiempo, quedan como trabajo futuro los siguientes puntos:

- Incluir soporte para el manejo de ventanas de tiempo o épocas en el modelo Logistic-CPT.
- Analizar y mejorar la distribución de los contenedores en el modulo CPP.
- Automatizar la toma de decisiones para los problemas CPP y CSSP cuando no existe una solución factible.
- Automatizar la generación de espacios para la asignación de los bloques para la carga de contenedores en buque.
- Mejorar el tiempo requerido para generar soluciones BAP.
- Mejorar el desempeño del algoritmo QCSP para obtener las mejores soluciones en el mismo tiempo.

Anexo A

A.1. Configuración de patio para CSSP

La Tabla A.1 representa una parte de la instancia para CSSP, ésta parte es la forma como están ordenados los contenedores en patio que serán cargados al buque. Cada bloque o conjunto representa un destino propio.

La primera línea indica la cantidad de contenedores almacenados en esa bahía. Tomando como ejemplo la cadena "1-1,1,1-40-1", esta nos indica la ubicación exacta del contenedor en patio. El primer valor "1-1" señala la zona "1", bahía "1" que al ser un número impar indica que los contenedores almacenados son de 40 pies. El siguiente valor "1-40-1" señala que está localizado en el primer nivel y es el contenedor con número de serie "40", el último dígito de este segmento indica que su peso es "1.º ligero". Al término de los cinco contenedores se localiza el número 10, indicando que el siguiente conjunto de contenedores es de 10 elementos.

Tabla A.1: Archivo de entrada con los bloques de patio

3	
1-1	1-40-1
1-1	2-41-1
1-2	1-42-2
5	
2-3	1-51-2
2-5	1-56-3
2-5	2-57-3
2-6	1-58-4
2-6	2-59-4

Anexo B

B.1. Detalle de las instancias BAP

La Tabla B.1 muestra los tiempos requeridos para completar cada tarea de cada buque i perteneciente al conjunto de instancias utilizado en la experimentación del capítulo 6.3.

Tabla B.1: Detalle de las instancias BAP

Instancia	Buque	Tareas	Tiempo de las tareas
1	1	10	131,190, 8, 69, 8, 2,200,192, 99,101
2	1	15	8, 52, 67, 33, 37, 2, 69, 20, 59, 99,125, 64, 8,167,190
3	1	15	131, 15, 97, 62,166, 69, 54, 22, 5, 29,106, 94, 3, 44,103
4	1	10	195, 94, 99, 5,106,103, 97, 69,101,131
5	1	10	131, 69,162, 3,129,200, 68,195, 5, 38
6	1	10	200,200,130, 82, 97, 70, 18,182, 10, 11
7	1	10	23,111,200, 88, 12, 70,118,200, 89, 89
8	1	15	13,162, 3, 68, 18, 32, 47, 37,129, 5,148, 28,172,131, 7
9	1	10	180,131,200, 20, 22, 30,200,161, 47, 9
10	1	100	24, 8, 43, 65, 39, 22, 39, 46, 17, 54,243, 2, 6, 57, 68, 97, 77,102, 75, 15, 64, 14,196, 31, 28, 77, 37,157, 12, 9,115, 6,189, 34, 30, 18,155,121, 30, 8,129, 53, 6,177, 24,131,147, 58, 93, 16, 40, 89, 3, 89, 33, 17, 37,139, 2, 9, 64, 53, 65, 44, 39, 79,209, 16, 6, 59, 13, 30, 5, 5, 55, 28, 61,109, 76, 86, 1, 19, 74, 35, 73, 55, 63, 25, 24, 31, 16,139, 4, 22, 17, 74,106,142, 57,199
1	2	15	70,115, 10, 51, 98, 79, 11,102, 82, 97, 18, 67,121, 25, 54
2	2	15	23, 88,118, 27,200, 89, 70, 13, 21, 12, 26, 55, 28,119,111
3	2	15	40,129, 1, 32, 8, 30, 20, 91,200, 15, 22, 32,180,115, 85
4	2	10	51, 38,148, 10,200, 52, 92, 19,200,190
5	2	10	183, 70, 16,111,200,130,197, 3, 17, 73
6	2	15	103, 7,190, 22, 51, 12, 38, 52, 70, 91, 31, 78,148, 10, 97
7	2	15	107, 3, 15,116, 52, 73, 38, 17,175,111, 8, 14, 70, 16,185
8	2	25	40, 7, 20, 64, 52, 8, 69, 2,111, 26, 8,125, 59, 2, 4, 77, 33, 67, 16, 52, 7, 67, 30, 46, 8
9	2	15	9,145, 36, 16, 37, 7, 4, 30, 64,191, 53,147, 76, 55,130
10	2	100	15, 77, 25,106, 43, 51, 38,125, 6, 48, 5,122, 19, 5,151,164, 70, 10,170, 34, 7, 17, 50,120, 65, 61, 16, 9, 20,227, 40, 4, 47, 96, 34,101, 72, 45,171, 2,103,108, 13, 67, 12, 11, 18, 53, 81, 14, 5, 48, 44, 24, 21,130,108,115, 25, 3, 16, 70, 13, 51, 58, 86, 38, 85, 82, 3,209, 62, 34, 8,258,267, 4, 46, 3, 54, 37, 14, 98, 7,202, 41, 48, 75,121, 66,108, 50, 12, 16, 40, 24, 30, 26, 44, 3
1	3	20	20, 33, 52, 64, 7, 69, 40,139, 7, 8, 67, 2, 4, 30, 52, 8, 59,125, 24,190
2	3	15	72, 60, 13,140, 14, 70, 33, 11, 18,154, 44,182, 99, 32, 58

Continuación de la tabla			
Instancia	Buque	Tareas	Tiempo de las tareas
3	3	20	5,106, 29, 41, 23, 66,131, 44, 69, 13, 54,125, 28, 53, 44, 2, 80, 3, 62, 22
4	3	15	8, 52, 67, 33, 37, 2, 69, 20, 59, 99,125, 64, 8,167,190
5	3	10	200,130,184, 30,147, 16, 4, 36, 53,200
6	3	15	131, 15, 97, 62,166, 69, 54, 22, 5, 29,106, 94, 3, 44,103
7	3	20	71, 32, 47, 13, 18, 1,162, 60, 1, 7, 3, 37, 46, 5,125, 28,129,148, 37, 30
8	3	35	86, 46, 52, 21, 30, 8, 39, 30, 20, 3, 19, 7, 39, 8, 33, 2, 8, 59, 23, 15, 28, 4, 37, 15, 64, 33, 40, 77, 47, 64, 2, 16, 7, 3, 15
9	3	35	34, 27, 22, 46, 22, 26, 45, 44, 13, 15, 89, 19, 12, 3, 3, 3, 18, 44, 28, 40, 42, 91, 36, 36, 40, 23, 59, 2, 23, 11, 25, 8, 26, 5, 20
10	3	100	95, 10, 8,182,122, 58, 36, 60, 31, 26, 6,179,117, 53, 96, 3, 65,101, 33, 13,184, 43, 51, 7,143, 30,121, 8, 78, 9, 12, 56, 33, 40, 32, 42, 98,100, 31, 57,117, 15, 23, 9, 19, 1, 6, 2,148,154, 7, 16,189, 61,109, 56, 29,112, 10,106, 36, 64, 34, 6, 53, 13,191,138, 32, 75, 4, 26, 19, 6, 21, 35,102,118, 9, 50, 35, 34, 58, 39, 64, 55, 45, 79, 87, 64,362, 21, 59, 20,129, 12, 13, 39, 25, 70
1	4	25	47, 12, 32, 13, 37, 1, 80, 13, 18, 30, 5, 64, 1, 7, 55, 71, 28, 5, 65, 37, 3,125, 60,150, 41
2	4	25	31, 55, 76, 5, 54, 26, 79, 78, 25, 73, 17,115, 20, 11, 34, 18, 76, 5, 42, 48, 35, 50, 6, 1, 20
3	4	20	17,102, 79, 54, 11, 55, 50, 82, 5, 18, 42, 1, 25, 69, 98, 31,115, 20, 5,121
4	4	15	13,162, 3, 68, 18, 32, 47, 37,129, 5,148, 28,172,131, 7
5	4	10	70,130, 58,154, 13,200, 33,140,142, 60
6	4	15	70,115, 10, 51, 98, 79, 11,102, 82, 97, 18, 67,121, 25, 54
7	4	25	34, 40, 13, 89, 21, 20, 25, 58, 13,111, 88, 26, 27, 28, 54, 23, 47, 8, 21, 12, 32, 86, 68, 55, 1
8	4	45	18,175,193, 4, 8, 50,132, 89, 46, 82, 8, 90, 88, 18, 45, 22, 57, 60, 59, 9,139, 12, 93, 19, 59, 1, 22, 11, 58,226, 7, 28, 8, 81, 12,116,144,177,231, 52, 20, 64, 44, 26, 97
9	4	35	32, 22, 67, 32, 2, 52, 22, 1, 5, 25, 60, 19, 12, 13, 13, 14, 35, 28, 47, 61, 18, 65, 30, 41,125, 37, 1, 12, 5, 45, 5, 47, 1, 3, 3
10	4	100	75, 1, 16, 82, 19, 1, 76, 1, 15,110, 6, 69, 74, 1, 55,140, 21, 44, 13, 5, 75, 60, 98, 10, 28, 29,101, 62, 5, 35,128, 98, 32, 47, 34, 78,146, 40, 63,106, 46,119, 66,226,162, 24, 9, 49, 20,214,169,105, 7, 27, 17, 25, 65,101,210, 17, 38, 7, 35, 87, 67,129, 18,184, 29,160, 16, 13, 5, 17, 91, 39, 98, 18, 71, 66, 1, 27, 25, 2, 46, 8,109,153, 84, 52,112,180, 57, 8, 29, 22, 8, 25, 69, 18
1	5	30	3, 33, 52, 46, 64,111, 20, 69, 8, 4, 39, 8, 21, 23, 7, 8, 67, 7, 59, 16, 15, 2, 77, 30, 2, 40, 86, 52, 3, 28
2	5	30	26, 36, 23, 11, 5, 20, 44, 44,106, 41, 3, 46, 2, 89, 42, 26, 3, 40, 40, 36, 53, 13, 34, 46, 28, 22, 12, 15, 3, 91
3	5	35	6, 11, 41, 26, 76, 35, 20, 5, 39, 18, 37, 4, 28, 55, 11, 79, 50, 20, 44, 35, 44, 54, 6, 13, 22, 29, 13, 17, 51, 18, 34, 1, 5, 21, 32
4	5	15	23, 88,118, 27,200, 89, 70, 13, 21, 12, 26, 55, 28,119,111
5	5	10	131,190, 8, 69, 8, 2,200,192, 99,101
6	5	15	40,129, 1, 32, 8, 30, 20, 91,200, 15, 22, 32,180,115, 85
7	5	30	13,150, 47, 13, 47, 41, 19, 12, 35, 17, 1, 1, 18, 28, 45, 5, 60, 5,125, 5, 2, 37, 65, 52, 3, 37, 32, 1, 54, 30
8	5	50	28, 12, 95,193, 8, 19, 57, 89, 90, 88,144, 18, 26, 97, 93, 20, 52, 45, 85,110, 9, 39, 58, 22, 20, 44, 11, 4, 59, 81, 1, 12, 8,177, 60, 7,122, 18, 47,121,116, 22,104,175, 8, 82, 44, 46, 50, 64
9	5	40	30, 4, 15, 29, 9, 59, 47, 30, 30, 1, 86, 3, 28, 33, 2, 20, 4, 3, 8, 17, 23, 21, 2, 7, 19, 40, 39, 37, 15, 8, 58, 33, 77, 15, 3, 51, 6, 16, 64, 8

Continuación de la tabla			
Instancia	Buque	Tareas	Tiempo de las tareas
10	5	100	146, 2,142, 1, 20,178,108, 96, 42, 4, 16, 24,100, 53, 43, 11, 4, 32, 12,211,175,165, 34, 26, 79, 50, 67, 40, 72,123,113, 67, 15, 11, 13,103, 42, 16, 24, 6, 14, 20, 59, 20, 32, 46, 36,250, 52, 13, 5, 50, 27,147,114,145, 22, 11, 71, 17, 71, 24, 24,122, 21, 26, 9, 12, 63, 32, 76, 42, 53, 19, 28, 14, 21, 66, 62,101,124, 81, 16, 93, 6,230,120, 10,172, 55, 14, 39,156, 42, 31, 8, 81, 32, 66,101
1	6	40	3, 89, 22, 19, 26, 3, 20, 5, 28, 44, 6, 22, 2, 27, 23, 41, 17, 25, 38, 44, 11, 18, 18, 7, 3, 23, 74, 40, 40, 2, 36, 12, 8, 15, 32, 36, 8, 45, 26, 42
2	6	40	35, 61, 25, 3, 37, 47, 5, 3, 52, 28, 13, 23, 1, 3, 22, 13, 32, 41, 45, 41, 30, 2, 32,125, 14, 19, 15, 18, 1, 42, 1, 52, 5, 13, 12, 12, 6, 6, 5, 60
3	6	35	64, 2, 8, 25,111, 34, 23, 26, 47, 6, 13, 12, 49, 56, 40, 39, 47, 32, 1, 1, 28, 88, 20, 27, 39, 12, 9, 7, 44, 7, 21, 13, 3, 21, 25
4	6	30	39, 17, 78, 73, 55, 6, 18, 35, 18, 5, 76, 35, 26, 21, 20, 41, 6, 13, 1, 50, 76, 4, 48, 5, 42, 79, 54, 20, 28, 11
5	6	10	195, 94, 99, 5,106,103, 97, 69,101,131
6	6	20	20, 33, 52, 64, 7, 69, 40,139, 7, 8, 67, 2, 4, 30, 52, 8, 59,125, 24,190
7	6	35	17, 30, 42, 4, 1, 32, 15,129, 6, 40, 23, 74, 39, 24, 45, 11, 8, 21, 38, 32, 17, 14, 18, 73, 20, 1, 39, 20, 21, 4, 94, 11, 20, 1, 16
8	6	55	44, 1,110, 20, 90, 15, 93, 58,144, 8, 3,116, 39, 18, 57, 47, 22, 89,175,121, 44, 59, 60, 46, 31, 11, 18, 85, 22, 9, 28, 12, 26, 64, 20, 12, 97, 95, 50,141, 1, 37,177,104, 8, 8, 4, 15, 88, 7, 45, 82, 50, 52,122
9	6	40	13, 1, 39, 34, 41, 6, 5, 26, 44, 41, 51, 50, 29, 13, 4, 5, 55, 13, 32, 37, 35, 22, 11, 13, 18, 20, 11, 4, 44, 18, 15, 54, 21, 11, 44, 35, 35, 6, 9, 35
10	6	100	65, 90, 19, 19, 62, 30,139,150,166, 10, 12, 19,104, 27,195, 96, 26, 5, 61, 24, 41, 31, 28, 70, 10, 23,267, 99, 5, 28, 42, 70, 12, 16, 46, 21, 62, 17, 10, 17, 44, 90, 88, 40, 19, 21, 71, 30,144, 26, 4, 26,190, 82, 27, 72, 34, 70,197, 37,158, 98, 92, 63, 8, 39, 26, 23, 2, 3, 28,160,191, 50, 7, 4,107, 12, 22, 18,142, 20, 14,137,120,159, 5, 12, 99, 50, 4,135, 6, 33, 58, 99, 52, 77, 75, 46
1	7	40	49, 32, 28, 88, 2, 36, 9, 5, 13, 30, 8, 33, 1, 23, 28, 42, 40, 7, 34, 12, 6, 20, 47, 3, 26,111, 34, 47, 25, 25, 1, 27, 21, 6, 2, 13, 26, 7, 21, 12
2	7	45	108, 65, 19, 6, 76,121,285, 70,314, 62, 61, 54,134,133, 25, 1, 57, 58, 54, 34, 5, 36, 19, 8, 26, 53, 9, 79, 13, 45, 22,126,118, 34,123,109, 31, 67, 54, 71, 67, 69, 25, 47, 7
3	7	40	1, 1, 20, 32, 39, 11, 18, 63, 3, 73,122, 6, 1, 30, 16, 36, 31, 39, 32, 38, 15, 42, 4, 20, 17, 20, 21, 7, 3, 24, 74, 4, 45, 23, 17, 4, 8, 18, 11, 11
4	7	30	27, 94, 16, 30, 20, 1, 39, 14, 62, 40, 50, 24, 25, 20, 32, 11, 32, 8, 74, 1, 23, 37,129, 42, 1, 4, 18, 38, 15, 73
5	7	10	131, 69,162, 3,129,200, 68,195, 5, 38
6	7	20	52,140, 99, 60, 38, 33, 13, 20, 29, 15,154, 18, 44, 70, 14, 3, 11, 43, 36,108
7	7	40	20, 50, 48, 16, 2, 6, 14, 9, 4, 74, 12, 1, 3, 5, 17, 10, 33, 17, 20, 73, 12, 79, 31, 21, 3, 47, 5, 35, 2, 8, 24, 18, 7, 14, 46, 21, 78, 26, 31, 58
8	7	70	85, 12,177, 7, 20, 69, 33,121, 22, 12,141, 3, 92, 59,100, 37, 8, 95, 26, 16, 40, 18, 2, 4, 1, 57, 97, 17, 58, 44, 57, 15, 94, 53, 19, 45, 3, 52, 8, 44, 31, 11, 30, 6, 28,116, 82, 50, 75, 18, 64, 8, 1, 23, 22, 38, 27, 8, 20, 28, 15, 46, 89, 16, 22,104, 60, 9, 52, 38
9	7	60	1,121, 58, 97, 11,116,110, 25, 15,122, 1,144, 57, 52, 95, 26, 8, 59, 31, 6, 18, 60, 52, 8, 50, 18, 3, 88, 9, 33, 46, 50, 20, 45, 53, 20, 37,104, 64, 38, 22, 22,177,175, 8, 44,141, 17, 30, 15, 12, 4, 89, 12, 40, 7, 44, 85, 57, 28

Continuación de la tabla			
Instancia	Buque	Tareas	Tiempo de las tareas
10	7	100	75, 2, 35,119, 48,120, 12, 6, 42, 11,167, 25,210, 1, 24, 8, 4, 37, 40, 26, 33, 37, 24, 37,132, 79,136, 12, 77,155, 20,422, 9,125, 57, 10, 17, 19,247, 68, 80,105, 82, 66, 40, 59, 20, 54, 25, 92, 22, 29, 3, 63, 55, 14, 20, 35,100, 30, 6, 12, 19,279, 24, 32, 15, 47, 12, 78, 58, 18, 26,106, 76,148, 7, 9, 1,196, 15, 39, 34, 38, 38, 54, 10,111, 47,183, 49,120, 11,108, 86, 49, 11, 66, 4, 36
1	8	50	67, 19, 25,108,118, 67, 35, 79, 54, 36,121,170,253,133, 8, 31, 58, 62, 57, 10, 61, 54, 47, 13, 34, 22, 25, 1,109, 61, 22, 22, 26,126, 7,123, 5, 6, 53, 54, 70, 9, 69, 76, 93, 34, 19, 49,134, 65
2	8	50	48, 19, 96, 37, 3, 10, 20, 16, 6, 90, 15, 22,136,118, 11, 65, 17, 2, 57, 5, 9, 10, 3,119,111, 19, 76,235, 60, 91, 18, 60,141,162, 4, 58, 38, 5, 17,136, 40, 36, 96, 48, 44, 34,199, 8,124,206
3	8	80	30,121, 57, 28, 24, 31, 2, 33,177,115, 65, 36,196,147, 73, 1,282, 6,209, 16, 22,106,125,189, 3,139,102, 97, 4, 46, 68,100, 53,194,139, 8,240, 17,100, 5, 9, 89, 55,199, 31, 39, 79, 17, 77, 2, 28, 77, 31,114, 30, 18, 53,143, 65, 75, 24, 58, 40, 13, 44, 93, 35, 76, 6, 5, 34, 17, 15, 45,129, 63, 89, 37,142,398
4	8	40	10, 25, 3, 2, 73, 95, 10, 17, 2, 9, 4, 29, 23, 29, 69, 8, 1, 3, 6, 4, 17, 50, 2, 70, 5, 14, 1, 15, 15, 76, 13, 34, 1, 21, 9, 35, 11, 74, 40, 75
5	8	10	200,200,130, 82, 97, 70, 18,182, 10, 11
6	8	20	16, 36,145, 37, 7, 1, 53, 11, 36, 30, 48,100, 8, 76, 55, 64,130, 4, 11,132
7	8	55	134, 2,121, 70,109, 69, 31, 58, 33, 25, 29, 33, 67, 62, 61, 6, 1, 61, 53, 13, 49, 10, 35, 54, 54, 65, 7, 9, 19,220, 27,123, 19, 47,133,170, 5, 36, 60, 79,126, 76, 22,118,108, 22, 34, 22, 54, 32, 1, 26, 67, 25, 8
8	8	75	22, 6, 46, 33, 17,114, 17, 31,151, 63, 77, 15,106, 57,194,210, 6,199, 16,147, 77,129,177,100,115, 93, 89, 24, 44, 35, 97,209, 13,189,125, 37, 33, 45,196, 89,398, 4,282, 30, 73, 31,139, 18, 8, 76,100, 3, 24, 39, 65, 55, 17, 30, 58, 1, 79, 53, 28, 65, 34, 5,121, 2, 53, 31, 36,139,240, 77,143
9	8	60	15, 33,108, 26, 69, 67, 38,121,118, 67, 70, 47, 54, 10, 36, 49,134, 76, 62,105, 22, 7, 5, 60, 12, 25, 66, 54, 25, 1, 65, 17, 34, 31, 9, 79, 33, 43, 32, 22, 2,170, 10, 35, 19, 19,126, 58, 61,123, 61, 6,133, 1, 22, 27, 54,105, 8, 13
10	8	100	16, 69, 49, 36, 8, 86, 4, 77, 88, 80, 78,280,115,157, 4, 3, 71,110, 92, 11,147, 19, 11, 75, 8, 22, 79, 19, 28, 14, 4,173, 54,184, 91, 26, 20,135, 54,123, 3, 4, 88, 24,101, 10, 82, 54, 6, 62, 25, 11, 43, 1, 11, 92, 90,112, 4,181, 13, 30, 47, 56, 80,128, 1, 15, 11, 36,131, 7, 4, 98, 48, 3, 9, 17, 47, 15, 32, 24, 77, 10,131, 58,139, 2, 50, 3, 70,172,319,101, 77, 15, 12, 38, 30,120
1	9	50	17,105, 14,134, 13,124, 54, 3, 8, 37, 29,165, 8, 87, 1, 4, 92, 60,173, 27, 1,104, 15,132, 12, 64, 32,109, 86, 66,124, 39, 23, 45, 41, 38, 11, 1, 37,161, 9, 53,152, 68,118, 33,106, 37, 16,112
2	9	50	21,103, 93,181, 1, 7, 42, 63, 16, 34, 40,130,100,108, 98, 56, 16, 73,135, 4, 2, 3, 38,127,142, 23, 25, 16,143, 1, 8, 34, 83, 79, 78, 70, 84,150,120, 28, 5, 35, 62, 64, 7, 58, 39, 80, 54, 21
3	9	80	3, 54,108, 34, 81,206,120, 8,171,209, 25,176,132,130,108, 30, 50,125, 6,252,267, 40, 13, 44,166, 16, 70, 5, 13,151, 16, 24, 50, 75, 16,135, 77,169,170, 86, 47, 3, 20,108, 38, 62, 24, 3, 97,122, 96,258, 34, 40, 50,108, 9, 67, 66, 44,151, 65, 15,156,154, 70, 38, 21,139, 19, 18, 14, 44, 10, 82, 53, 14, 2, 5, 3
4	9	40	8, 1, 83, 16, 20, 14, 64, 46, 26, 37, 48, 9, 11, 10, 16, 14, 5,100, 1, 1, 15, 20, 70, 3, 50, 41, 21, 18, 9, 21, 16, 7, 2, 55, 8, 7, 19, 43, 34, 11
5	9	10	23,111,200, 88, 12, 70,118,200, 89, 89
6	9	20	52,140, 99, 60, 38, 33, 13, 20, 29, 15,154, 18, 44, 70, 14, 3, 11, 43, 36,108
7	9	55	40, 55, 9, 38,136,118, 4, 15,138, 96, 10, 19, 44, 32, 22, 90,235, 60, 6,141, 60,174, 10,124, 91, 29, 11,136, 96, 19, 65, 71, 76, 24, 34, 48,199, 37, 17, 18, 2, 17, 3, 48,111, 16, 5, 3, 20, 58, 7, 2, 8, 48, 5

Continuación de la tabla			
Instancia	Buque	Tareas	Tiempo de las tareas
8	9	100	7, 50, 31,118,201, 38, 77, 57, 30, 33, 43, 14, 59, 1, 6, 90, 27, 13, 30, 71, 76,104, 6, 1, 90, 84, 33, 56, 89, 85, 24, 7, 31,259, 10, 92, 14, 64, 6, 30, 57, 42, 48, 98, 38, 10, 65, 95,128, 1, 45,126,121,114, 73, 11, 79, 15,112, 20, 22, 32, 15,313, 5, 84, 61, 38,107, 73, 88, 98,110, 22,151, 68, 22, 38,122, 3, 39, 77, 5, 64, 7, 78,100,173,151, 26,111, 18, 41, 76, 5, 6, 20, 43, 16, 17
9	9	80	122, 39, 72, 35,154,104, 3, 50, 42, 9, 75, 2, 21, 20, 96,119, 34, 36, 79,362, 58, 13,124, 33, 29,112, 65, 6, 15,215, 4, 12,102,164,179, 6, 25, 12, 26, 75, 78, 98,182, 39, 10,247, 8,184, 35,191,117,129,117, 95, 94, 9, 53, 87, 57, 34, 7,111,132, 61, 23, 19, 81,101, 56, 31, 31,159, 56, 70, 71,143, 25, 42,109, 59
10	9	100	35, 6, 88, 73, 3, 23,216, 92, 1,144,100, 39, 48, 43, 36, 14, 6, 39,206, 76, 68, 62, 34, 40, 18, 97, 1, 18, 31, 40, 23,167, 21, 52, 53, 56, 53, 27, 80, 7, 16, 5, 14, 66,273, 7, 62, 47, 39,104, 64, 66, 6, 66, 75,145, 83, 30, 13, 15, 56, 17, 6,103,211,323, 30, 15, 4, 88,135, 92, 99, 29, 4, 23, 7, 87, 17, 58, 21, 41, 50, 18, 3, 81, 70,113,203, 41, 59, 45, 57, 97, 73, 63, 3, 22, 25, 79
1	10	100	24, 8, 43, 65, 39, 22, 39, 46, 17, 54,243, 2, 6, 57, 68, 97, 77,102, 75, 15, 64, 14,196, 31, 28, 77, 37,157, 12, 9,115, 6,189, 34, 30, 18,155,121, 30, 8,129, 53, 6,177, 24,131,147, 58, 93, 16, 40, 89, 3, 89, 33, 17, 37,139, 2, 9, 64, 53, 65, 44, 39, 79,209, 16, 6, 59, 13, 30, 5, 5, 55, 28, 61,109, 76, 86, 1, 19, 74, 35, 73, 55, 63, 25, 24, 31, 16,139, 4, 22, 17, 74,106,142, 57,199
2	10	80	153, 49, 93, 29, 24, 1,105, 34, 77, 65,210, 60, 66, 7,184, 49, 35, 82, 16, 57, 74, 99, 78, 25, 75, 87,106, 10, 98, 2,146,128,144,129, 1, 27, 84,214,140, 18, 46,162, 17, 81, 18, 15,267, 76,139,102,124,160, 19, 35, 78,180, 5, 20, 74, 44, 75, 5, 28, 98,118, 91,190, 63, 15, 6, 21, 29,131, 13, 25, 1, 39,226, 66, 17
3	10	80	103,141,101, 1, 86, 66, 24, 71,180, 71, 63, 62, 20, 32, 26, 12,146, 13,122, 55, 67,126, 4, 11,230, 96, 87, 31, 16, 84, 39, 11, 26,158,198, 28, 32, 8,108, 6,165, 15,101, 90, 93,250, 16,240, 16, 32,220, 14, 43, 24, 76,100, 50, 67, 19, 40, 52, 70, 59,255, 10,147, 2,123, 90, 45,175, 32,120, 14,211, 72, 13, 68, 6, 4
4	10	40	10, 4, 3, 11, 17, 13, 20, 9, 5, 24, 39, 70, 10, 57, 63, 44, 24, 23, 3, 27, 27, 52, 14, 4, 3, 40, 11, 15, 36, 38, 3, 24, 10, 29, 3, 29, 7, 14, 11,154
5	10	10	180,131,200, 20, 22, 30,200,161, 47, 9
6	10	20	15, 14, 1, 2, 73, 3, 38, 8,175, 6,100, 70, 2, 15, 25, 91, 14, 52,111,185
7	10	100	15, 77, 25,106, 43, 51, 38,125, 6, 48, 5,122, 19, 5,151,164, 70, 10,170, 34, 7, 17, 50,120, 65, 61, 16, 9, 20,227, 40, 4, 47, 96, 34,101, 72, 45,171, 2,103,108, 13, 67, 12, 11, 18, 53, 81, 14, 5, 48, 44, 24, 21,130,108,115, 25, 3, 16, 70, 13, 51, 58, 86, 38, 85, 82, 3,209, 62, 34, 8,258,267, 4, 46, 3, 54, 37, 14, 98, 7,202, 41, 48, 75,121, 66,108, 50, 12, 16, 40, 24, 30, 26, 44, 3
8	10	100	95, 10, 8,182,122, 58, 36, 60, 31, 26, 6,179,117, 53, 96, 3, 65,101, 33, 13,184, 43, 51, 7,143, 30,121, 8, 78, 9, 12, 56, 33, 40, 32, 42, 98,100, 31, 57,117, 15, 23, 9, 19, 1, 6, 2,148,154, 7, 16,189, 61,109, 56, 29,112, 10,106, 36, 64, 34, 6, 53, 13,191,138, 32, 75, 4, 26, 19, 6, 21, 35,102,118, 9, 50, 35, 34, 58, 39, 64, 55, 45, 79, 87, 64,362, 21, 59, 20,129, 12, 13, 39, 25, 70
9	10	80	22, 46,166, 70, 99, 98, 21, 99, 10,234, 6, 71,190, 12, 18, 19, 92, 23,107, 5, 24, 33, 19, 20, 41, 22, 82,160, 26,139, 88,104, 65, 62, 39, 4, 75, 42, 5,122,221, 30, 17, 31, 21,158, 28,197,191, 7, 71, 58,106, 26, 75, 12,142, 19, 28, 46, 90,120, 4, 37, 23,190, 50,137,144,195,369, 34, 50,158, 62,150, 26, 26, 10, 61
10	10	100	75, 1, 16, 82, 19, 1, 76, 1, 15,110, 6, 69, 74, 1, 55,140, 21, 44, 13, 5, 75, 60, 98, 10, 28, 29,101, 62, 5, 35,128, 98, 32, 47, 34, 78,146, 40, 63,106, 46,119, 66,226,162, 24, 9, 49, 20,214,169,105, 7, 27, 17, 25, 65,101,210, 17, 38, 7, 35, 87, 67,129, 18,184, 29,160, 16, 13, 5, 17, 91, 39, 98, 18, 71, 66, 1, 27, 25, 2, 46, 8,109,153, 84, 52,112,180, 57, 8, 29, 22, 8, 25, 69, 18

Anexo C

Las siguientes tablas muestran los resultados obtenidos por el algoritmo híbrido HACS-GRASP.

Tabla C.1: Resultados Grupo A

	1	2	3	4	5	6	7
1	519	510	512	517	514	518	519
2	509	509	514	514	517	516	521
3	513	514	513	512	516	518	520
4	510	519	513	513	515	519	517
5	544	512	511	513	517	518	522
6	519	512	524	518	513	516	521
7	521	510	513	519	512	517	521
8	513	508	512	512	517	519	518
9	528	510	513	513	516	517	521
10	549	513	512	513	514	523	519

Tabla C.2: Resultados Grupo B

	1	2	3	4	5	6
1	791	822	842	844	810	809
2	791	806	876	800	829	832
3	819	876	905	822	866	835
4	915	882	841	857	851	879
5	798	816	823	807	833	811
6	842	819	867	788	826	847
7	870	797	890	837	811	813
8	830	794	875	819	815	816
9	824	829	833	843	838	832
10	881	931	881	830	856	886

Tabla C.3: Resultados Grupo C

	1	2	3	4	5	6
1	1236	1296	1204	1166	1228	1190
2	1180	1124	1204	1205	1183	1172
3	1227	1151	1210	1149	1124	1197
4	1165	1244	1234	1284	1235	1280
5	1248	1218	1249	1169	1185	1168
6	1268	1185	1115	1241	1172	1195
7	1235	1236	1318	1260	1213	1176
8	1216	1181	1212	1157	1170	1183
9	1205	1253	1167	1159	1113	1163
10	1222	1268	1217	1143	1181	1129

Tabla C.4: Resultados Grupo D

	1	2	3	4	5	6
1	548	467	435	1269	1304	1251
2	651	447	336	1284	1261	1270
3	683	455	442	1343	1303	1372
4	583	366	360	1294	1307	1285
5	369	377	361	1277	1363	1284
6	431	363	333	1251	1275	1291
7	495	386	349	1291	1295	1268
8	398	348	366	1269	1302	1274
9	448	331	409	1253	1241	1270
10	395	416	382	1275	1303	1305

Tabla C.5: Resultados Grupo E

	1	2	3	4	5
1	816	810	817	817	820
2	831	832	819	819	823
3	871	841	841	845	892
4	884	898	890	913	920
5	813	826	816	825	814
6	855	867	861	861	846
7	811	816	800	801	801
8	793	812	795	804	804
9	833	825	823	820	821
10	845	844	845	827	845

Tabla C.6: Resultados Grupo F

	1	2	3	4	5
1	1534	1043	820	763	742
2	1532	1032	823	782	780
3	1532	1040	892	793	787
4	1531	1057	920	766	761
5	1532	1038	814	749	741
6	1531	1039	847	730	726
7	1532	1036	801	794	792
8	1530	1045	804	702	653
9	1529	1050	821	813	810
10	1533	1042	845	732	695

Tabla C.7: Resultados Grupo G

	1	2	3	4	5
1	802	820	1070	1392	1519
2	795	823	968	1300	1345
3	829	854	999	1118	1323
4	833	883	1122	1384	1470
5	808	800	852	1055	1341
6	802	846	1050	1275	1637
7	799	801	1055	1444	1475
8	803	804	968	1110	1360
9	810	821	1089	1265	1346
10	811	845	945	1206	1459

Bibliografía

- [IPM] *Infraestructura Portuaria Mexicana S.A. de C.V.*; Terminal de usos múltiples de Altamira, Tamaulipas, <http://www.ipmaltamira.com.mx/>.
- [Diran 2010] *Profits and Growth Opportunities in Container Port Logistics Software*; Diran Majarian, www.glgroup.com, 2010.
- [Meisel 2010] *A unified approach for the evaluation of quay crane scheduling models and algorithms* Frank Meisel, Christian Bierwirth, *Computers and Operations Research* 38 (2011) 683–693, 2010.
- [Infante 2010] *Eficiencia portuaria en Norteamérica* Zoe Infante Jiménez, *Revista Mexicana de Estudios Canadienses* Num 19, 2010.
- [Cordeau 2007] *The Service Allocation Problem at the Gioia Tauro Maritime Terminal*, Jean-François Cordeau, *European Journal of Operational Research*, Volume 176, Issue 2, Pages 1167–1184, 2007.
- [Amil 2004] *Integración urbana de los espacios portuarios*, Cristina Amil López, <http://www.udc.es/iuem>, IUEM Universidad de la Coruña, Doc. 9-2004
- [ISO 6346] *ISO 6346:1995*, <http://www.iso.org/>, 1995.
- [Rebollo 2002] *Una sistema multi-agente para la automatización de terminales de contenedores*, M. Rebollo, Universidad Politécnica de Valencia, 2002
- [Bazzazi 2009] *A genetic algorithm to solve the storage space allocation problem in a container terminal*, Mohammad Bazzazi, *Computers & Industrial Engineering*, Vol 56, pages 44–52, Elsevier ,2009
- [Kim & Park 2004] *A crane scheduling method for port container terminals*, Kap Hwan Kim, Young-Man Park. Department of Industrial Engineering, Pusan National University, Changjeon-dong, Kumjeong- ku, Pusan 609-735, South Korea , 2004
- [Loo 2007] *An optimization model for storage yard management in transshipment hubs*, Loo Hay Lee, Ek Peng Chew, Kok Choon Tan and Yongbin Han, 2007.
- [Basse S. 1998] *Basse S. Computer Algorithms, Introduction to Design and Analysis*. Editorial Addison-Wesley Publishing Company, 1998.

- [Meisel 2009] *A fast heuristic for quay crane scheduling with interference constraints* Frank Meisel, Christian Bierwirth, Springer Science+Business Media, LLC, 2009.
- [SAS 2009] *Statistical Analysis System (SAS)*, <http://www.sas.com>, Version 9, 2008
- [L.K Sibbesen 2008] *Mathematical models and heuristic solutions for container positioning problems in port terminals* Lois K. Sibbesen, , Technical University of Denmark Department of Management Engineering, PhD thesis, February 2008.
- [Ambrosino 2006] *A decomposition heuristics for the container ship stowage problem*, Daniela Ambrosino · Anna Sciomachen, Springer Science + Business Media, LLC 2006.
- [Delgado 2010] *A Constraint Programming Model for Fast Optimal Stowage of Container Vessel Bays*, Alberto Delgado, IT University of Copenhagen , Technical Report Series TR-2010-133, 2010.
- [Yongpei 2002] *A multiprocessor task scheduling model for berth allocation: heuristic and worst-case analysis*, Yongpei Guan, Elsevier Science B.V, Operations Research Letters 30 (2002) 343 – 350, 2002.
- [Vacca 2010] *The Tactical Berth Allocation Problem* Integrated optimization in container terminals, Ilaria Vacca, IDSIA - Lugano, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2010
- [Kim 2010] *A Distributed Framework for Yard Planning in Container Terminals*, Kap Hwan Kim, The 11th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference, 2010.
- [Sammarrà 2006] *A Tabu Search Heuristic for the Quay Crane Scheduling Problem* , Marcello Sammarra, Dipartimento di Elettronica, Informatica e Sistemistica, Università della Calabria, 87036 Rende (CS), Italy, 2006.
- [Tavakkoli 2008] *An efficient algorithm for solving a new mathematical model for a quay crane scheduling problem in container ports*, R. Tavakkoli-Moghaddam, Computers and Industrial Engineering 56 (2009) 241–248, Elsevier, 2008.
- [Vidal 2010] *Building Agent-Based Models of Seaport Container Terminals*, José M. Vidal y Nathan Huynh, Proc. of 6th Workshop on Agents in Traffic and Transportation, Kluegl, Ossowski, Chaib-Draa and Bazzan (eds.), May, 11, 2010,
- [Garey y Jonson] Garey M. R., Jonson D. S. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman and Company, 1979. A classic introduction to the field.
- [Meisel 2008] *Seaside Operations Planning in Container Terminals* , Frank Meisel , Contributions to Management Science , Physica-Verlag A Springer Company, 2008.
- [Klein R] Klein R., Scholl A. *Bin Packing*, <http://www.wiwi.uni-jena.de/Entscheidung/binpp/>

- [SCH] *Sistema de la Colonia de Hormigas para resolver problemas de Optimización Combinatoria*, José Cajilima Alvarado, Universidad Politécnica Salesiana / Ingeniería de Sistemas, Cuenca Ecuador, <http://es.scribd.com/doc/59014777/Sistema-de-La-Colonia-de-Hormigas>.