

# OPTIMIZACIÓN DE LAS OPERACIONES PORTUARIAS MEDIANTE SIMULACIÓN Y METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

## OPTIMIZATION OF HARBOR OPERATIONS USING SIMULATION AND SURFACE RESPONSE METHODOLOGY

María José Contreras<sup>1</sup>, Felipe Baesler<sup>1</sup>, Loreto Maldonado<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad del Desarrollo, Concepción, Chile

### RESUMEN

Este artículo presenta los resultados de la utilización de herramientas de optimización estocástica, mediante simulación y metodología de superficie de respuesta, en un caso real del ámbito logístico portuario. El problema en estudio corresponde al dimensionamiento del área de transferencia de contenedores de un nuevo muelle en el puerto de Coronel, en la octava región del país. Básicamente la problemática implica definir los requerimientos de equipamiento necesarios (grúas portacontenedores y camiones) que permitan el cumplimiento de estándares de utilización y eficiencia del proceso de carga y descarga de contenedores al menor costo de inversión posible. La metodología utilizada para resolver el problema consiste en la creación de un modelo de simulación de eventos discretos, que imita el comportamiento del área de transferencia de contenedores. Los resultados de diversos experimentos generados por el modelo de simulación permiten levantar información suficiente para la aplicación de técnicas de Diseño Experimental que finalmente sirven para la estimación de una superficie de respuesta que aproxime el comportamiento del proceso en estudio. Finalmente las ecuaciones estimadas se utilizaron para la aplicación de un proceso de optimización con el fin de determinar los requerimientos de equipamiento necesarios para lograr una optimización en el uso de los recursos. Los resultados obtenidos permiten dimensionar los requerimientos de equipamiento para dos escenarios diferentes, incorporando dentro del proceso de optimización la aleatoriedad propia de este tipo de sistemas.

**Palabras clave:** Optimización, operaciones portuarias, simulación, superficie de respuesta.

### ABSTRACT

This article presents the results of the utilization of stochastic optimization tools, through simulation and response surface methodology, to a real case of harbor logistics. The problem under consideration corresponds to the sizing of the container transfer area of a new pier in the port of Coronel, in the eighth region of the country. Basically the problem involves defining the equipment requirements necessary (cranes and tractors) in order to comply with utilization and efficiency standards of the containers loading and unloading process at the lowest possible investment cost. The methodology used to solve the problem is the creation of a discrete event simulation model, which mimics the behavior of the area of containers transfer. The results of various experiments generated by the simulation model allows to gather sufficient information to apply Experimental Design techniques that are finally used to estimate a response surface that approximates the behavior of the process under study. Finally, the estimated equations were used for the implementation of an optimization process in order to determine equipment requirements needed to achieve an optimal use of resources. The results permit the sizing of equipment requirements for two different scenarios, incorporating into the optimization process the natural randomness of this type of systems.

**Keywords:** Harbor operations, optimization, response surface, simulation.

## INTRODUCCIÓN

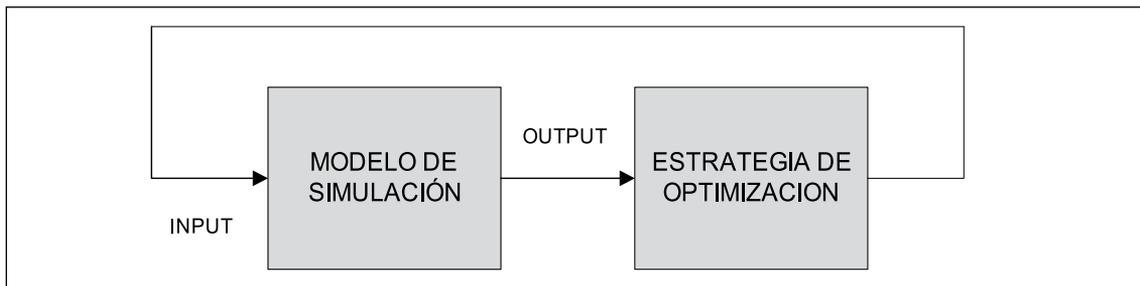
El movimiento portuario en la octava región de Chile es una actividad de gran intensidad, principalmente por los envíos de exportaciones del ámbito forestal, productos tales como tableros y molduras, los cuales han experimentado un incremento de un 93% entre los años 2003 y 2006. Estos productos requieren un modo de empaque para su transporte que les proporcione protección del medio y facilidad para su manipulación. La consolidación de este tipo de carga en contenedores satisface dicha necesidad. Lo anterior afecta las operaciones de puertos como Puerto de Coronel, cuyos productos más importantes en la transferencia de carga son la celulosa, la madera aserrada, rollizos aserrables, rollizos pulpables y otras maderas como por ejemplo, tableros MDF, tableros contrachapados, tableros de partículas o aglomerado, tableros laminados, etc.

Con el objeto de evitar el costo asociado al tiempo de espera de los buques por un puerto de atraque, y al mismo tiempo mantener un bajo riesgo de congestión, se ha hecho necesaria la construcción de un nuevo muelle. La oferta portuaria es amplia en la región y muy competitiva, es importante mantener niveles bajos de ocupación de los puertos de atraque para no perder clientes (bajo el 50% de ocupación). Por lo tanto, el segundo muelle en construcción por parte de Puerto de Coronel debe contar con la cantidad necesaria de maquinaria y equipo que permita su correcto funcionamiento, manteniendo la inversión en estos ítems en el mínimo posible.

Esto lleva a plantear la necesidad de una herramienta de apoyo a la toma de decisiones relacionada con el área de transferencia de contenedores del Puerto de Coronel, que apunte a mantener a la empresa como una alternativa atractiva para los clientes, dado el buen nivel de servicio que se espera entregar. La alta variabilidad que presenta este tipo de procesos hace necesario enfrentarlo mediante técnicas que sean capaces de capturar el comportamiento estocástico y dinámico propio de este tipo de problemas. Para esto se propone la aplicación de técnicas de optimización en simulación por medio de simulación discreta y modelos de superficie de respuesta. Esta combinación de herramientas crean la posibilidad de estimar ecuaciones matemáticas que aproximan el comportamiento logístico del muelle.

## MARCO TEÓRICO

Optimización en simulación es la práctica de unir un método de optimización con un modelo de simulación para determinar el conjunto apropiado de ciertos parámetros de entrada de modo de maximizar el desempeño de un sistema simulado (Bowdwn & Hall, 1998). La optimización en simulación puede definirse como el proceso de encontrar los mejores valores para las variables de entrada dentro de todas las posibilidades, sin explícitamente evaluar cada posibilidad. Un problema de optimización en simulación es un problema de optimización donde la función objetivo y/o algunas restricciones, son respuestas que sólo pueden ser evaluadas a través de simulación computacional. Como tales, estas funciones son sólo funciones implícitas de los parámetros de decisión del sistema. Además, estas funciones son frecuentemente de naturaleza estocástica. La figura 1, muestra el esquema iterativo de un proceso de optimización en simulación. Las salidas de un modelo de simulación son utilizadas por una estrategia de optimización que provee una retroalimentación sobre el progreso de la búsqueda de la solución óptima. Esto a su vez provee nuevas entradas al modelo de simulación.



**Figura 1:** Proceso iterativo de optimización en simulación

De acuerdo a Andradottir (1998), la simulación se hace necesaria cuando el sistema de interés es bastante complejo y se requiere evaluar su desempeño para cada conjunto de valores de los parámetros de entrada; por lo tanto, la técnica que se use para optimizar el desempeño esperado del sistema debe ser lo bastante robusta como para converger a pesar de las perturbaciones o errores en las evaluaciones del desempeño, además de que la técnica debe ser razonablemente eficiente en cuanto a recursos computacionales. Aquí se requiere lograr un balance, dado que dicha eficiencia es difícil de lograr porque la utilización de la simulación, para evaluar el desempeño del sistema para un solo conjunto de valores de los parámetros de entrada con una cierta precisión, es de por sí bastante intensiva en términos computacionales, más aun si se requiere evaluar el desempeño del sistema para varios conjuntos de valores de los parámetros de entrada.

En relación a los procedimientos existentes para realizar un proceso de optimización en simulación, Fu *et al.*, 2005 identifican seis enfoques principales en la literatura de simulación.

- Procedimientos de ranking y selección
- Metodología de superficie de respuesta
- Procedimientos basados en gradiente
- Búsqueda aleatoria u optimización estocástica
- Optimización por camino de muestra
- Metaheurísticas

Una descripción detallada de cada uno de estos procedimientos puede ser encontrado en (Carson & Maria 1997) (Fu *et al.*, 2005). Una breve descripción de Metodología de Superficie de Respuesta se presenta a continuación.

Metodología de Superficie de Respuesta, fue desarrollado por Box & Wilson en 1951 para mejorar los procesos de manufactura en la industria química. El propósito era optimizar las reacciones químicas para obtener mayor rendimiento y pureza a bajo costo. Esto se logró mediante el uso de una serie de experimentos que incluían un conjunto de factores. En el caso de simulación el procedimiento corresponde a ajustar una serie de modelos de regresión con las respuestas de un modelo de simulación evaluado en varios puntos y tratando de optimizar la función de regresión resultante (Azadivar 1999). El proceso comienza con una función de regresión de primer orden y con un método de búsqueda de pendiente ascendente o descendente. Después de alcanzar la vecindad del óptimo, se emplean funciones de regresión de mayor grado (Carson & Maria, 1997).

En general, la Metodología de Superficie de Respuesta requiere un pequeño número de experimentos de simulación en comparación con los muchos métodos de optimización basados en el gradiente (Carson & Maria, 1997).

## Aplicaciones de Optimización en Simulación

La optimización en simulación ha sido aplicada a una gran variedad de actividades industriales, donde el principal problema en la práctica es descubrir cuáles son los escenarios que se deben investigar para la toma de decisiones, y sobre todo cómo identificar buenos escenarios que permitan encontrar las mejores decisiones.

A continuación, se describen algunos usos de optimización en simulación en problemas reales, agrupados de acuerdo al método utilizado:

### a) Procedimiento de ranking y selección

Morrice *et al.*, 1998, combinan la teoría multi-atributo de utilidad con la técnica estadística de ranking y selección llamada zona de indiferencia, para seleccionar la mejor configuración de un proyecto de levantamiento topográfico. Otro caso es Swisher & Jacobson (1999), donde se plantea la combinación de procedimientos de ranking y selección con procedimientos de comparación múltiple para determinar el diseño óptimo de una consulta médica, de entre un conjunto de alternativas.

### b) Metodología de Superficie de Respuesta

En el caso de Zhang *et al.*, 2009, se utiliza simulación y metodología de superficie de respuesta para generar reglas de despacho en un proceso de manufactura de semiconductores. Una aplicación en el área de la salud es presentada por Baesler *et al.*, 2003, donde utilizan un modelo de simulación para estimar la demanda máxima posible en la sala de emergencias del Hospital del Trabajador en Concepción, Chile. Mediante la aplicación de DOE se determina el número mínimo de recursos físicos y humanos necesarios para servir la demanda manteniendo el tiempo estándar de espera del paciente.

En Yalcinkaya & Bayhan(2009), es presentada una aplicación para optimizar el tiempo promedio de transporte en una línea de metro y en Baesler *et al.*, 2004, se presenta un modelo de simulación de eventos discretos para un aserradero de Chile, cuyo objetivo principal fue detectar el cuello de botella del proceso productivo. Para analizar las oportunidades de mejora del sistema se realizó un estudio de diseño de experimentos que consideró cuatro factores principales que podían tener un impacto en el desempeño de las máquinas cuello de botella, utilizando como medida de desempeño la productividad del sistema en troncos por día.

### c) Métodos de Búsqueda Basados en Gradiente

Sanchez *et al.*, 2010, demuestran la efectividad del método de dominio de frecuencia para filtrar de entre 34 factores en un modelo de simulación de tarjetas kanban. Otra aplicación corresponde a Kim (2006), donde se muestra el desempeño de dos técnicas basadas en gradiente, aproximación estocástica y aproximación de promedio muestral, para resolver el problema multiobjetivo del vendedor de diarios, para elegir el nivel óptimo de los recursos necesarios para la producción que maximice el beneficio operacional máximo esperado.

### d) Búsqueda Aleatoria u Optimización Estocástica

En Hutchinson & Hill (2001), proponen solucionar el problema de retrasos en el tráfico aéreo utilizando simulación y métodos de optimización estocástica, específicamente la aproximación estocástica de perturbación simultánea y Lee *et al.*, 2006, utilizan la búsqueda aleatoria como mecanismo de búsqueda, integrándolo con selección estadística para resolver problemas multiobjetivo de administración de inventario.

#### e) Optimización por camino de muestra

Gurkan *et al.*, 1999, aplicaron una variante del método de camino de muestra para resolver un problema de diseño de redes, minimizando la suma de los costos de asignación de capacidad y una medida de capacidad esperada y en Ferris *et al.*, 2000, proponen resolver optimizaciones en simulación paramétrica continua utilizando algoritmos de optimización no lineal determinística y simulaciones con camino de muestra. Se aplicó este método a tres problemas de colas prácticos: un problema de cola estable M/M/1, un sistema de telemarketing, y finalmente un problema de optimización de una línea de producción.

#### f) Métodos Heurísticos – Metaheurísticos

En Klassen & Yoogalingam (2009), se integra simulación con un algoritmo genético para la optimización en la programación de pacientes en un sistema hospitalario. En April *et al.*, 2006, ejemplifican el uso de optimización en simulación para administrar procesos de negocios, utilizando la herramienta OptQuest a una sala de emergencia hospitalaria, y para seleccionar los niveles de personal requerido en una compañía de seguros. Un problema multiobjetivo es presentado por Baesler & Sepúlveda (2006), el cual integra un modelo de simulación con una heurística de algoritmo genético y un modelo de programación por metas.

### Actividad Portuaria

Algunas aplicaciones reales de simulación en el área de manejo portuario pueden ser encontradas en Van Rensburg *et al.*, 2005, quienes desarrollaron un modelo de simulación de las operaciones de transporte de contenedores llamado SimSea, el cual imita a cabalidad todos los procesos que ocurren desde que se retiran los contenedores desde los depósitos hasta que llegan al cliente. Hartmann (2004), propone un enfoque para generar escenarios para un terminal portuario de contenedores, con el fin de utilizar estos escenarios como datos de entrada para modelos de simulación. Este enfoque es particularmente útil en los casos en los que el terminal está por ser construido, o el terminal existente será ampliado, y para analizar desarrollos futuros tales como más llegadas de naves, o llegadas de naves de mayor tamaño., presentan una forma para diseñar una estación de ferrocarril que se incorpora en un terminal portuario de contenedores utilizando simulación para comparar las alternativas de diseño resultantes. Lee *et al.*, (2007), utilizan la simulación para investigar cómo la utilización de diferentes Layout y vehículos para el transporte de contenedores afectan la operación del puerto. Para evaluar el desempeño se utiliza el número de contenedores movilizado por grúa por cada hora de trabajo, de acuerdo a lo indicado por el modelo de simulación. Dos aplicaciones que integran simulación y optimización pueden ser encontradas en Zeng & Yang (2009) y Sacone & Siri (2009). En ambos caso el objetivo del estudio apunta a la optimización en el manejo de contenedores en terminales portuarios.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Con el objeto de evitar el costo asociado al tiempo de espera de las naves por un sitio de atraque, el Puerto de Coronel ha considerado la necesidad de construir un nuevo muelle, el cual está actualmente en etapa de construcción y consiste en dos puertos de atraque y una mayor superficie de almacenamiento. La oferta portuaria es amplia en la región y muy competitiva, es importante mantener niveles bajos de ocupación de los puertos de atraque para no perder clientes (bajo el 50% de ocupación). Por lo tanto, el segundo muelle en construcción por parte de Puerto de Coronel debe contar con la cantidad necesaria de maquinaria y equipo que permita su correcto funcionamiento, manteniendo la inversión en estos ítems en el mínimo posible. Una descripción simplificada del proceso se presenta en el punto siguiente.

### Descripción del Proceso

En el puerto comercial de interés, los procesos operativos relacionados con el transporte de contenedores pueden ser de tipo indirecto, ya que implican el acopio de los contenedores en patio durante un periodo de tiempo limitado. Si la carga no estuviera acopiada en patio, se trataría de un proceso operativo de tipo directo. El proceso operativo podrá ser de recepción de contenedores o de envío de contenedores. La recepción de contenedores vacíos (Figura 2) comienza con el arribo de un buque a un sitio asignado de atraque en el puerto, se procede a la descarga de los contenedores programados para lo cual las grúas de muelle toman los contenedores de la nave y los colocan sobre el acoplado de los camiones plataforma (tractors), los cuales se dirigen al sitio designado para el contenedor en el patio de acopio, allí una grúa portacontenedores (tipo Reachstacker) toma los contenedor de los camiones y los ubica en la posición programada en el patio de acopio. Los contenedores se mantienen en el patio de acopio hasta la fecha de envío al receptor final, día en el cual una grúa portacontenedor descarga los contenedores y los coloca sobre los camiones que los llevarán a su destino final.

El proceso de envío de contenedores llenos (Figura 3) comienza con la recepción de los camiones que traen los contenedores a ser exportados, los cuales son descargados de los camiones por grúas portacontenedores y acopiados en el patio, con anterioridad al arribo del buque que los recogerá. Cuando dicha nave atraca en el muelle, los contenedores son descargados por las grúas portacontenedores y colocados sobre los acoplados de los camiones plataforma, los cuales llevan los contenedores hasta el muelle, donde la grúa de muelle los toma y carga en el buque de acuerdo a una determinada programación.

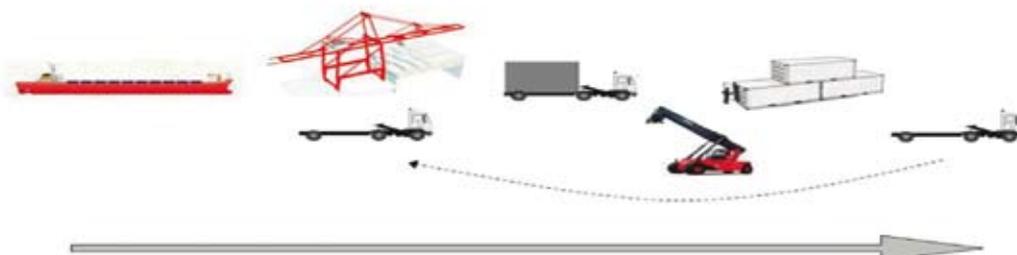


Figura 2: Recepción de contenedores



Figura 3: Envío de contenedores

Existe un tercer proceso que se debe realizar en algunas ocasiones, llamado re-estiba o shifting. Hay ocasiones en las cuales la carga de interés del buque viene "sobre-estibada", es decir, tiene otros contenedores encima de ella que bloquean su movimiento y que no deben ser descargados de la nave en el puerto donde ha atracado, sino en uno posterior al presente. En este caso, se procede a descargar los contenedores bloqueadores, ya sea sobre la cubierta de la nave, en otro lugar de la bodega de la nave, sobre el muelle del puerto u otro lugar, luego se descargan los contenedores de interés, y finalmente se vuelve a cargar la nave (re-estibar) con los contenedores bloqueadores.

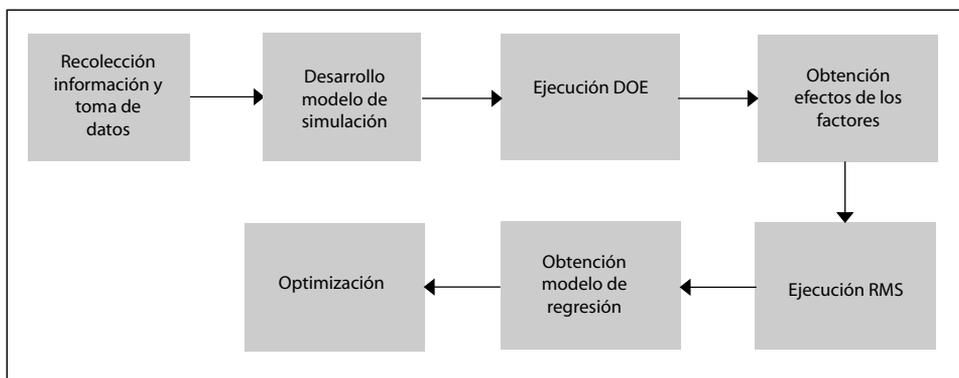
De esta manera el objetivo del estudio finalmente se centra en la determinación de la flota necesaria de grúas portacontenedores (reachstackers) para contenedores llenos y para contenedores vacíos, y la flota de camiones con plataforma (tractors) que permitan que el porcentaje de utilización de las grúas pórtico de muelle (gantry) sea de al menos un 95% del tiempo que están siendo requeridas por una nave en el muelle, y de al menos un 85% del tiempo que están siendo requeridas por dos naves en el muelle.

## RESULTADOS

La situación expuesta anteriormente es básicamente un problema de optimización, sin embargo dada la naturaleza no determinística que presenta el proceso bajo análisis, además de una estructura dinámica y compleja, hace recomendable el modelamiento de la situación problema a través de herramientas de simulación de eventos discretos. Este esquema de trabajo permite representar fácilmente la estructura estocástica y cambiante del proceso, además de simplificar la representación del funcionamiento operativo del muelle, aspectos que podrían ser complejos de representar mediante ecuaciones matemáticas. La simulación corresponde a un modelo de tipo descriptivo, es decir presenta el comportamiento de un sistema frente a diferentes condiciones operacionales propuestas por el usuario, lo que se traduce en que no es una herramienta de optimización propiamente tal como lo sería un modelo matemático tradicional. Por esta razón para cumplir con el objetivo del estudio, que corresponde básicamente a optimizar el proceso y determinar la combinación de variables (número de grúas portacontenedores y la flota de camiones con plataforma) que permite lograr los estándares definidos, se hace necesario utilizar herramientas adicionales al modelo de simulación, de manera que a través de una interacción de modelos sea posible lograr la optimización buscada. Este procedimiento se denomina optimización en simulación y básicamente significa la utilización del modelo de simulación como la función objetivo del problema, una función de la cual no se sabe su estructura analítica, sin embargo se tiene un modelo que a partir de variables de entrada es capaz de generar respuestas. Al hacer interactuar este modelo de simulación con algún tipo de herramienta de optimización, a través de un procedimiento iterativo, es posible generar un proceso de búsqueda de soluciones en dirección a una zona cercana al óptimo. En el marco teórico de este artículo se presentaron las diferentes alternativas existentes para realizar el proceso de optimización en simulación. En este estudio se consideró la utilización de herramientas de diseño experimental y superficie de respuesta como solución apropiada para cumplir con los objetivos del estudio.

La figura 4, presenta la metodología general empleada. Los dos primeros cuadros representan las etapas iniciales necesarias para crear el campo en el cual ejecutar los experimentos a diseñar. Se debe realizar un levantamiento de datos en diversos puertos del país para recabar información que permita modelar el sistema de interés; así se podrá desarrollar posteriormente un modelo de simulación que imite el comportamiento esperado del área de contenedores de Puerto de Coronel, y se convierta en el campo de experimentación a utilizar. Los siguientes dos cuadros reflejan la aplicación de diseño de experimentos, se deben ejecutar los experimentos diseñados sobre el modelo de simulación desarrollado, para así determinar los efectos de cada factor de interés considerado y descartar los factores cuyos efectos carezcan de significancia

estadística. Los dos cuadros posteriores reflejan la aplicación de la Metodología de Superficie de Respuesta, donde se utilizan los factores que fueron encontrados significativos por el diseño de experimentos, para estimar una ecuación de regresión que exprese la variable respuesta en función de los factores, y prediga de ese modo el valor de dicha variable para un rango dado de los valores de los factores. Finalmente, se llega a la etapa de optimización de la inversión en equipamiento necesario, utilizando como parte de las restricciones el resultado de la aplicación de la Metodología de Superficie de Respuesta de la etapa anterior.



**Figura 4:** Metodología utilizada

### Modelo de Simulación

El primer paso en el desarrollo de la metodología expuesta anteriormente corresponde al desarrollo del modelo de simulación que tendrá por objetivo representar el comportamiento del proceso de carga y descarga de contenedores en el muelle del Puerto de Coronel. Es importante mencionar que el proceso expuesto ilustra las operaciones en Puerto de Coronel y no necesariamente representa la generalidad de las operaciones portuarias en otros lugares. Una descripción lógica del modelo se puede resumir considerando tres tipos de operaciones principales las cuales se denominan secuencias de carga, descarga y re-estiba las cuales describen a continuación:

La secuencia de carga comienza con el contenedor lleno capturando una grúa portacontenedores para contenedores llenos en alguno de los 15 sectores definidos en el patio para el acopio de contenedores llenos. El contenedor captura un tractor y la grúa portacontenedores lo carga sobre él, luego el contenedor libera la grúa portacontenedores. El camión plataforma transporta el contenedor hasta el muelle, donde el contenedor captura una de las grúas de muelle y a su vez libera el camión. La grúa de muelle ejecuta el proceso de carga del contenedor a la nave, y luego el contenedor la libera.

La secuencia de descarga comienza con el contenedor vacío en la nave capturando una grúa de muelle. Se ejecuta el proceso de descarga y el contenedor captura un camión plataforma liberando a su vez la grúa de muelle. El camión transporta el contenedor hasta alguno de los 8 sectores definidos en el patio para el acopio de contenedores vacíos, una vez ahí, el contenedor captura una grúa portacontenedores para contenedores vacíos y libera el camión, la grúa descarga el contenedor y lo acopia en el patio para finalmente liberar la grúa portacontenedores.

La secuencia de re-estiba se desarrolla por completo en el muelle por lo que no requiere ni de tractor ni de grúas portacontenedores. El proceso comienza con el contenedor en la nave capturando una grúa de muelle, la cual descarga el contenedor para luego ser liberada por él. A continuación, el mismo contenedor captura nuevamente una grúa de muelle para que lo vuelva a cargar el buque y posteriormente la libera.

Existe otro movimiento que deben realizar las grúas pórtico de muelle, que consiste en retirar y posteriormente volver a colocar las plataformas que separan los distintos niveles de contenedores en las naves. Este movimiento ha sido modelado como una falla de las grúas pórtico de muelle, el cual ocurre cada una hora y tiene una duración de 2,5 minutos, durante este tiempo las grúas quedan en estado "Failed" no pudiendo ser capturadas por ningún contenedor.

Con el fin de representar el comportamiento aleatorio del modelo de simulación se hace necesario la recolección de información para el modelamiento estadístico de las variables que controlan el modelo de simulación. Es necesario conocer la distribución de la cantidad de movimientos por nave para cada tipo de contenedor y la distribución de los diferentes tiempos de proceso. Se requiere conocer la distribución de los tipos de movimientos que se deben ejecutar por cada buque, es decir:

- Cantidad de movimientos de carga de contenedores llenos. (Número de contenedores llenos a cargar).
- Cantidad de movimientos de descarga de contenedores vacíos. (Número de contenedores vacíos a descargar).
- Cantidad de movimientos de re-estiba de contenedores. (Número de contenedores a re-estibar, es decir descargar y volver a cargar, sin pasar por el patio de acopio).

Esta información se obtuvo de una visita a un puerto de la región, que entregó los datos correspondientes a la cantidad de movimientos por nave para la carga, la descarga y re-estiba de 52 naves, que fueron atendidas durante los últimos cuatro meses del año 2007. Esto se considera una muestra representativa, debido a que de acuerdo a la información entregada por el puerto, la cantidad de movimientos realizados por mes es relativamente constante durante todo el año, por lo tanto, en una muestra de cuatro meses, cualquier estacionalidad que se pudiera presentar estaría incluida.

Además, se requiere conocer la distribución de los siguientes tiempos:

- Tiempo de descarga de contenedores de la nave al tractor utilizando una grúa móvil de muelle (T1).
- Tiempo de carga de contenedores del camión plataforma (tractor) a la nave utilizando una grúa móvil de muelle (T2).
- Tiempo de descarga de contenedores de la nave al camión plataforma utilizando una grúa pórtico de muelle (T3).
- Tiempo de carga de contenedores del camión plataforma a la nave utilizando una grúa pórtico de muelle (T4).
- Tiempo de descarga de contenedores del camión plataforma al patio de acopio utilizando una grúa portacontenedores para contenedores vacíos (T5).
- Tiempo de carga de contenedores desde el patio de acopio al camión plataforma utilizando una grúa portacontenedores para contenedores llenos (T6).

Para obtener esta información, se realizaron visitas a tres puertos del país que realizan movimiento de contenedores. Estas visitas se realizaron en distintos días de la semana, ya que los puertos visitados operan de lunes a domingo no habiendo variación en los rendimientos de cada día de la semana, debido a que los atraques de los buques están programados de forma homogénea durante la semana. La información recolectada se utilizó para realizar un ajuste de curvas estadísticas que permitan representar el comportamiento de cada uno de los parámetros descritos. La representatividad de los resultados se comprobaron a través de pruebas de bondad de ajuste, Chi-Cuadrado o Kolmogorov-Smirnov, dependiendo de las características de los datos. De acuerdo al análisis de datos de entrada, la creación del número de contenedores llenos a cargar se distribuye Normal con media 395 y desviación estándar de 105 (Cargas  $\sim N(395, 105)$ ). La creación del número de contenedores vacíos a descargar distribuye Normal

con media 297 y desviación estándar de 134 (Descargas  $\sim N(297, 134)$  truncada en el 0). La creación del número de contenedores a re-estibar distribuye Exponencial con parámetro 53,5 (Re-estibas  $\sim EXP(53,5)$ ). Los resultados de los tiempos T1 a T6 se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1:** Distribuciones de Tiempos de Procesos

| Tiempo | Expresión de la Distribución |
|--------|------------------------------|
| T1     | 53 + 175*BETA (2,87; 4,25)   |
| T2     | 86 + Gamma (30,9 ; 1,76)     |
| T3     | Normal (78,2 ; 19,2)         |
| T4     | 76,5 + Gamma (27,5 ; 1,28)   |
| T5     | 28,5 + Gamma (9,06 ; 3,58)   |
| T6     | 34,5 + Gamma (7,32 ; 3,01)   |

A partir de esta información se procede a la construcción del modelo de simulación. Se utilizó el software de simulación de eventos discretos ARENA en su versión 10.0. Posteriormente se procede a la determinación del número de réplicas necesarias para lograr la validez estadística deseada, la cual se logra con un total de 20 réplicas. Para la validación del modelo de simulación se consideró la variable de respuesta tiempo total de proceso de un buque. Se realizó una prueba t de comparación de medias entre los datos reales del puerto y los resultados de la simulación. Los resultados no arrojaron diferencia significativa entre ambas poblaciones. De igual forma, se consultó con profesionales expertos de un puerto de la región, quienes indicaron que en apariencia el modelo de simulación logra imitar el comportamiento de un puerto tipo. En base a estos antecedentes se considera que el modelo es una representación válida del proceso real.

## Diseño Experimental

El paso siguiente corresponde a la aplicación del diseño experimental, el cual permitirá establecer la significancia estadística en cada uno de los factores considerados en el modelo. De esta manera se han definido tres factores: cantidad de camiones plataforma o tractors (Factor 1), grúas portacontenedores para contenedores llenos (Factor 2), y grúas portacontenedores para contenedores vacíos (Factor 3). Para cada uno de estos factores se definirán dos niveles, teniendo así un diseño factorial del tipo 2<sup>3</sup>. A continuación se presentan los resultados del diseño experimental para cada escenario (uno dos buques) por separado.

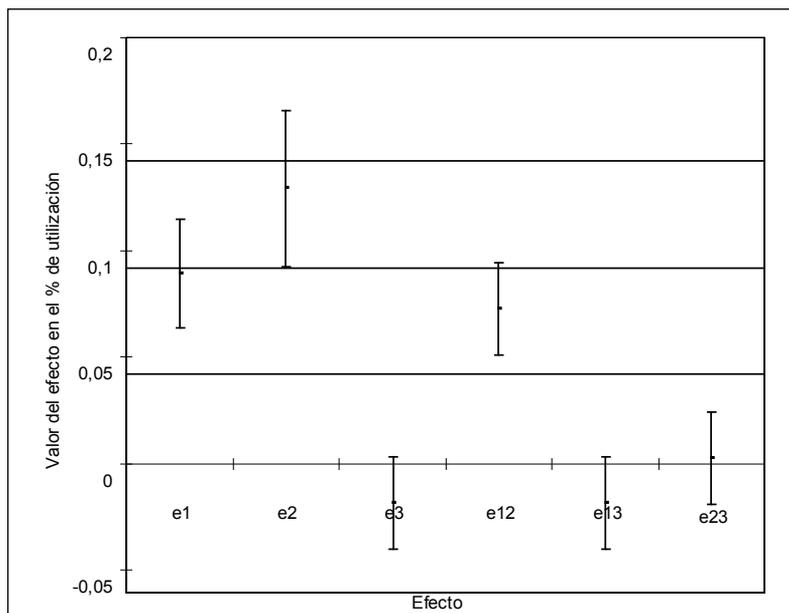
### Escenario un buque

Los niveles definidos para el escenario de un buque se muestra en la tabla 2.

**Tabla 2:** Niveles de factores escenario un Buque

| Factor | Nivel Bajo | Nivel Alto |
|--------|------------|------------|
| 1      | 6          | 12         |
| 2      | 2          | 6          |
| 3      | 2          | 4          |

Dado que se considerarán 3 factores, cada uno con dos niveles, entonces el número total de experimentos es:  $2^3 = 8$ . Posteriormente se debe correr la simulación para los 8 experimentos con 20 réplicas cada uno, y se obtienen los resultados para el porcentaje de utilización instantánea de las grúas pórtico de muelle. La figura 5 muestra la significancia de cada uno de los 3 efectos, mas las 5 interacciones respectivas.



**Figura 5:** Gráfico de significancia, efectos escenario un Buque

En la figura 5, se puede ver que en cuanto a los efectos esperados individuales, 1 de los 3 Intervalos de Confianza contiene el 0, por lo que se puede afirmar que la variación del Factor 3 no presenta significancia estadística. Sólo tienen importancia el Factor 1 (camiones plataforma o tractores) y el Factor 2 (grúas portacontenedores para contenedores llenos), por separado. Además se puede decir que existe una interacción estadísticamente significativa, ya que el Intervalo de Confianza para el efecto de la interacción entre los factores 1 y 2, no contiene el 0. El mayor incremento en el porcentaje de utilización instantánea de las grúas pórtico viene de un cambio en el factor 2, es decir aumentar de 2 a 6 la cantidad de grúas portacontenedores para contenedores llenos, logrando en promedio un aumento de 13,7% en el porcentaje de utilización.

***Escenario dos buques***

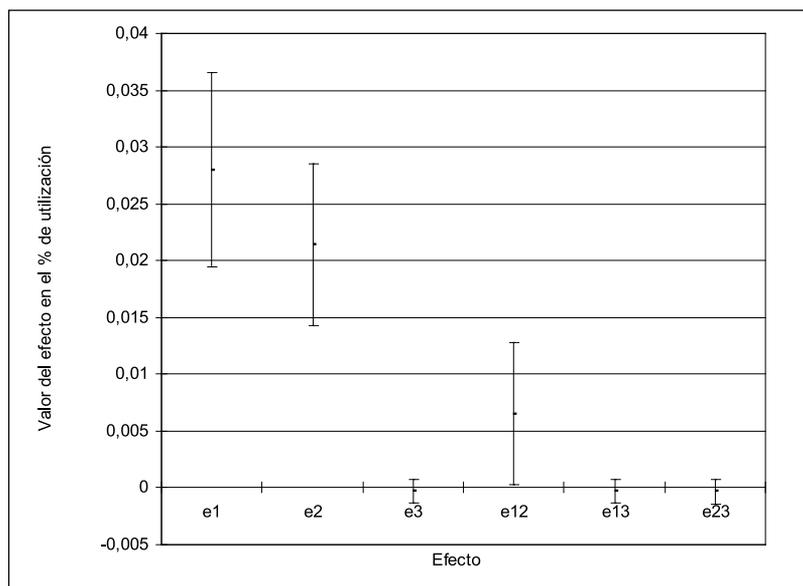
Para el caso de dos buques en muelle, dado que la cantidad de movimientos a realizar puede ser el doble que en el escenario de una nave se ha considerado que los niveles bajo y alto sean el doble que para el caso de una nave en muelle. Por lo tanto, se han definido los siguientes niveles de cada factor, los cuales se muestran en la tabla 3.

**Tabla 3:** Niveles de factores para escenario de dos Buques

| Factor | Nivel Bajo | Nivel Alto |
|--------|------------|------------|
| 1      | 12         | 24         |
| 2      | 4          | 12         |
| 3      | 4          | 8          |

Este diseño de experimentos, al igual que para el caso de una nave en muelle, es del tipo:  $2k = 23 = 8$ . Posteriormente se correr la simulación para los 8 experimentos con 20 réplicas cada uno, y se obtienen los resultados para el porcentaje de utilización instantánea de las grúas pórtico de muelle.

La figura 6 muestra la significancia de cada uno de los 3 efectos, mas las 5 interacciones respectivas.



**Figura 6:** Gráfico de significancia, efectos escenario dos Buques

En la figura 6, se puede ver que en cuanto a los efectos esperados individuales, 1 de los 3 Intervalos de Confianza contiene el 0, por lo que se puede afirmar nuevamente que el Factor 3 no presenta significancia estadística. Sólo tienen significancia el Factor 1 (camiones plataforma-tractores) y el Factor 2 (grúas portacontenedores para contenedores llenos), y su respectiva interacción. De acuerdo a lo anterior, se logra un incremento en el promedio del porcentaje de utilización instantánea de las dos grúas pórtico ya sea por un cambio en el Factor 1, es decir aumentar de 12 a 24 la cantidad de camiones plataforma, o por un cambio en el Factor 2, es decir aumentando de 6 a 12 las grúas portacontenedores para contenedores llenos. En el primer caso, se logra en promedio un aumento de 2,8% en el promedio del porcentaje de utilización. En el segundo caso, se logra en promedio un aumento de 2,1% en el promedio del porcentaje de utilización de las dos grúas pórtico de muelle.

### Superficie de Respuesta

En función de los resultados obtenidos de la aplicación de diseño de experimentos, se consideran sólo los factores que se han encontrado importantes para construir un metamodelo que explique el comportamiento del modelo de simulación. En ambos escenarios el Factor 3 no presenta significancia estadística por lo cual se fijó en su nivel bajo, 2 para el escenario 1 y 4 para el escenario 2. Este metamodelo obtenido a través de metodología de superficie de respuesta, toma la forma de una ecuación de regresión que predice el valor de la variable respuesta en función de las combinaciones de los niveles de los factores de interés y la interacción entre ellos, logrando reducir un sistema complejo a una expresión que puede optimizarse utilizando técnicas de fácil uso y acceso.

#### Escenario de un buque en muelle

En este escenario las variables naturales se denominan como t para el total de los camiones plataforma, y g para el total de las grúas portacontenedores para contenedores llenos; los promedios entre los niveles alto y bajo de estas variables se denominan como y, siendo sus valores de 9 y 4 respectivamente. Además, las diferencias entre los niveles alto y bajo de cada

variable se denominan  $\Delta t$  y  $\Delta g$  y cuyos valores son de 6 para la diferencia de los camiones plataforma y de 4 para la diferencia de las grúas portacontenedores para contenedores llenos. En función de lo anterior se definen las variables codificadas de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$x_t = \frac{2(t-\bar{t})}{\Delta t} = \frac{2(t-9)}{6} = \frac{t}{3} - 3$$

$$x_g = \frac{2(g-\bar{g})}{\Delta g} = \frac{2(g-4)}{4} = \frac{g}{2} - 2$$

En primera instancia se asume que la esperanza de la variable respuesta  $E[U(t,g)]$  en función de la cantidad de camiones plataforma y grúas portacontenedores para contenedores llenos, puede representarse con un modelo de regresión de primer orden. De la siguiente forma:

$$E[U(t, g)] = \beta_0 + \beta_t \cdot x_t + \beta_g \cdot x_g + \beta_{tg} \cdot x$$

Siguiendo la metodología de Law y Kelton (2000), para estimar los coeficientes del modelo de regresión de primer orden utilizando el método de los mínimos cuadrados, se ocupan los resultados obtenidos en la aplicación de diseño de experimentos realizada con 20 réplicas de los efectos estimados de los factores relevantes y de su interacción y del valor promedio de la variable respuesta en los cuatro puntos del diseño factorial. El modelo resultante corresponde a:

$$U(t,g) = 0.8302 + 0.05286 \cdot x_t + 0.0622525 \cdot x_g + 0.0361825 \cdot x_t \cdot x_g$$

en su forma codificada y

$$U(t,g) = 0.7642 - 0.0065017 \cdot t - 0.0231475 \cdot g + 0.00603042 \cdot t \cdot g$$

en su forma natural.

El metamodelo obtenido se representa gráficamente en la figura 7, correspondiente a la superficie de respuesta de primer orden para el escenario de una nave. En ella se puede ver cómo cambia la variable de respuesta  $U$  en función de las diferentes combinaciones de los valores de los factores  $(t,g)$ .

Superficie de Respuesta  $U(t, g)$  Primer Orden

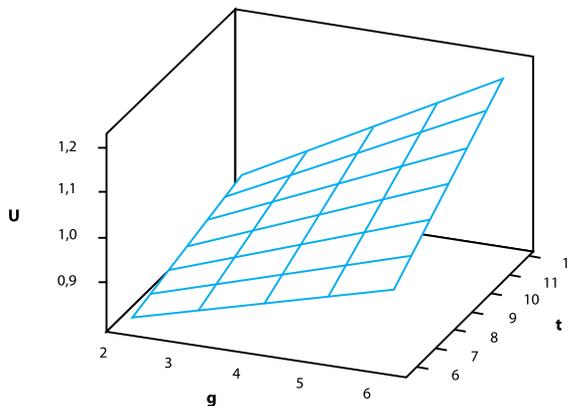
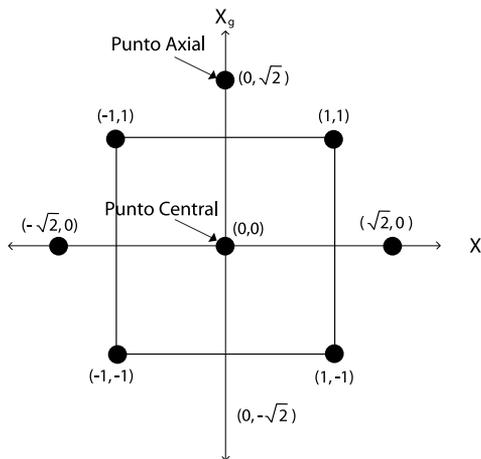


Figura 7: Superficie de respuesta de primer orden, escenario un Buque

Luego se verifica si el modelo de primer orden es una buena aproximación mediante la comparación del punto central del diseño evaluado en la simulación y en el modelo de regresión, concluyendo que existe diferencia significativa, por lo cual se procede a estimar un modelo de segundo orden. Para estimar los coeficientes de la regresión de este nuevo modelo es necesario crear un Diseño Central Compuesto (CCD por sus siglas en inglés de Central Composite Design) en el cual se aumentan los cinco puntos de diseño existentes con cuatro nuevos puntos axiales, los que se deben encontrar a una distancia de  $\sqrt{k}$  del punto central, en este caso dado que se trata de 2 factores, la distancia será de  $\sqrt{2}$ . La figura 8 muestra el diseño central compuesto.



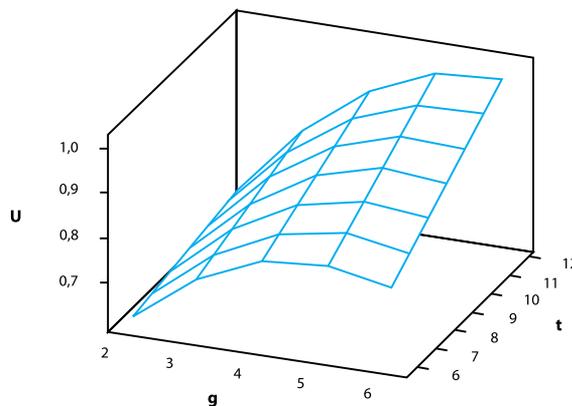
**Figura 8:** Diseño central compuesto

Finalmente es posible estimar el siguiente modelo de segundo orden expresado en base a sus variables naturales

$$U(t,g)=0.415568-0.004348 \cdot t+0.155969 \cdot g+0.0060305t \cdot g-0.0196945 \cdot g^2$$

La figura 9 muestra la superficie de respuesta correspondiente.

Superficie de Respuesta U (t, g) Segundo Orden



**Figura 9:** Superficie de respuesta de segundo orden, escenario un Buque

Para verificar si la regresión de segundo orden es una buena aproximación a la superficie de respuesta del modelo de simulación, se examinan los cuatro nuevos puntos axiales. Se compara el valor promedio de 20 réplicas para estos cuatro puntos con el valor de la ecuación anterior

evaluada en cada uno de ellos. Se concluye que el modelo de regresión obtenido es una buena aproximación del modelo de simulación.

**Escenario de dos buques en muelle**

El procedimiento para este escenario es similar al presentado en el escenario de una nave, por esta razón se presentarán los resultados sin mayores explicaciones del procedimiento. En este escenario las variables naturales también se denominan como t para el total de los camiones plataforma, y g para el total de las grúas portacontenedores para contenedores llenos; los promedios entre los niveles alto y bajo de estas variables se denominan como  $\bar{t}$  y  $\bar{g}$ , siendo esta vez sus valores de 18 y 8 respectivamente. Además, las diferencias entre los niveles alto y bajo de cada variable también se denominan  $\Delta t$  y  $\Delta g$ , cuyos valores son de 12 para la diferencia de los camiones plataforma y de 8 para la diferencia de las grúas portacontenedores para contenedores llenos. En función de lo anterior se definen las variables codificadas de acuerdo a las siguientes expresiones.

$$x_t = \frac{2(t - \bar{t})}{\Delta t} = \frac{2(t - 18)}{12} = \frac{t}{6} - 3$$

$$x_g = \frac{2(g - \bar{g})}{\Delta g} = \frac{2(g - 8)}{8} = \frac{g}{4} - 2$$

Siguiendo el procedimiento mostrado en el escenario de un buque se obtiene el siguiente modelo de regresión de primer orden.

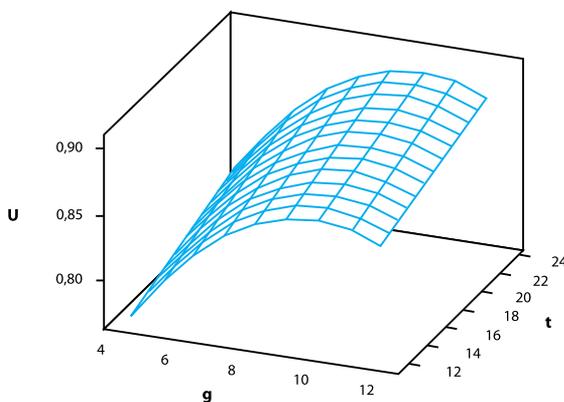
$$U(t,g) = 0.8060775 + 0.00121427 \cdot t + 0.00014375 \cdot g + 0.00014326 \cdot t \cdot g$$

Se concluye que existe diferencia significativa con el modelo de simulación por lo cual se procede a ajustar el modelo regresión de segundo orden. Para esto se aplica el diseño central compuesto al igual que el escenario anterior y se obtiene el siguiente modelo de segundo grado expresado en variables naturales, el cual es verificado.

$$U(t,g) = 0.60484 + 0.002419 \cdot t + 0.047166 \cdot g - 0.00237319 \cdot g^2$$

La Figura 10 muestra la superficie de respuesta del modelo de segundo orden.

Superficie de Respuesta U (t, g) Segundo Orden



**Figura 10:** Superficie de respuesta de segundo orden, escenario dos Buques

## Optimización

Utilizando las expresiones obtenidas a través de la aplicación de la Metodología de Superficie de Respuesta, se busca la combinación óptima de factores que minimice los costos de inversión en equipamiento manteniendo al menos un 95% de utilización de las grúas pórtico de muelle para el escenario de una nave, y de al menos un 85% para el escenario de dos naves. Los costos unitarios de inversión en equipamiento a considerar de acuerdo a la estimación realizada por Puerto de Coronel, son de US\$ 60.000.- para los camiones plataforma, y de US\$ 400.000.- para las grúas portacontenedores para contenedores llenos. Para llevar a cabo lo anterior se ocupó la herramienta Solver de MS Excel, debido a que el tamaño del problema no amerita la utilización de un software más sofisticado. Los parámetros del modelo de minimización de costos para ambos escenarios son:

- Ct: costo unitario de camiones plataforma (tractors), en US\$.
- Cg: costo unitario de grúas portacontenedores de contenedores llenos, en US\$.
- t: cantidad de camiones plataforma (tractors) a adquirir.
- g: cantidad de grúas portacontenedores de contenedores llenos a adquirir.

El modelo resultante para el escenario de una nave se muestra en la figura 11:

$$\begin{aligned} \text{F.O.: } & \text{Min } C_t \cdot t + C_g \cdot g \\ \text{s.a.:} & \\ & 0,415568 - 0,004348 \cdot t + 0,155965 \cdot g + 0,0060305 \cdot t \cdot g - 0,0196945 \cdot g^2 \leq 1 \\ & 0,415568 - 0,004348 \cdot t + 0,155965 \cdot g + 0,0060305 \cdot t \cdot g - 0,0196945 \cdot g^2 \geq 0,95 \\ & t \leq 12 \\ & t \geq 6 \\ & g \leq 6 \\ & g \geq 2 \\ & t, g: \text{entero} \\ & t, g \geq 0 \end{aligned}$$

**Figura 11:** Modelo escenario un Buque

La primera y segunda restricciones representan los valores máximo y mínimo esperados de la utilización de las grúas pórtico de muelle. La tercera y cuarta restricciones representan las cantidades máxima y mínima consideradas en el diseño para el factor camiones plataforma, a su vez la quinta y sexta restricciones representan las cantidades máxima y mínima consideradas en el diseño para el factor grúas portacontenedores para contenedores llenos. Finalmente la séptima y octava restricciones indican que ambos factores deben ser cantidades enteras positivas.

La resolución del modelo anterior, arroja como resultado 12 camiones plataforma, 4 grúas portacontenedores para contenedores llenos, logrando un costo de inversión de US\$ 2.320.000 en estos equipos, y una utilización esperada de un 96,16% para las grúas pórtico de muelle. Además, se debe recordar que las grúas portacontenedores para contenedores vacíos han sido fijadas en 2 unidades, cuyo costo de inversión debe sumarse al anteriormente mencionado.

El modelo resultante para el escenario de dos buques se muestra en la figura 12:

$$\text{F.O.: } \text{Min } C_t \cdot t + C_g \cdot g$$

s.a.:

$$0,60484+0,002419 \cdot t+0,047166 \cdot g-0,00237319 \cdot g^2 \leq 1$$

$$0,60484+0,002419 \cdot t+0,047166 \cdot g-0,00237319 \cdot g^2 \geq 0,85$$

$$t \leq 24$$

$$t \geq 12$$

$$g \leq 12$$

$$g \geq 4$$

t, g: entero

$$t, g \geq 0$$

**Figura 12:** Modelo escenario dos Buques

Los resultados obtenidos son 13 camiones plataforma, 7 grúas portacontenedores para contenedores llenos, logrando un costo de inversión de US\$ 3.580.000 en estos equipos, y una utilización esperada de un 85,02% para las grúas pórtico de muelle. Además, se debe recordar que las grúas portacontenedores para contenedores vacíos han sido fijadas en 4 unidades, cuyo costo de inversión debe sumarse al anteriormente mencionado.

## DISCUSIÓN

Este artículo muestra como la aplicación de simulación de eventos discretos en conjunto con metodología de superficie de respuesta permite enfrentar un problema complejo de comportamiento estocástico y dinámico, en el cual se busca la minimización de los costos de inversión para un proceso logístico portuario. Los resultados de la aplicación de la metodología muestran cómo es posible minimizar los costos de inversión y cumplir al mismo tiempo con los estándares de utilización propuestos por la empresa. Se analizaron dos escenarios diferentes en los cuales se considera la atención de uno y dos buques respectivamente, obteniendo resultados para el dimensionamiento del patio de transferencia de contenedores para cada uno de los casos. La metodología utilizada permitió establecer el nivel de importancia de cada una de las variables consideradas en el análisis, concluyéndose que el factor 3 (grúas portacontenedores para contenedores vacíos) no presentaba significancia estadística en la variable de respuesta utilización, por esta razón en ambos escenarios se fijó en su nivel bajo, 2 y 4 respectivamente. Este aspecto permite un ahorro importante al no invertir en recursos que no adhieren valor al proceso. Finalmente el uso de metodología de superficie de respuesta permitió enfrentar el problema de simulación, con su correspondiente estructura estocástica, como una función objetivo, que puede ser optimizada, al menos dentro del rango de análisis estudiado, utilizando herramientas tradicionales de programación matemática no lineal.

## REFERENCIAS

**Andradottir, S. (1998).** Simulation Optimization Handbook of Simulation. Banks, Jerry Ed. Estados Unidos, John Wiley & Sons, 1998. pp. 307-333.

**April, J., Better, M., Glover, F., Kelly, J., & Laguna, M. (2006).** Enhancing Business Process Management with Simulation Optimization. Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. Monterey, Estados Unidos, L.F. Perrone, F.P. Wieland, J. Liu, B.G. Lawson, D.M. Nicol, y R.M. Fujimoto Eds., 2006. pp. 642-649.

- Azadivar, F. (1999).** Simulation Optimization Methodologies. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference. Phoenix, Estados Unidos, P.A.Farrington, H.B. Nembhard, D.T. Sturrock, y G.W. Evans Eds., 1999. pp. 93-100.
- Baesler, F., & Sepúlveda, J. (2006).** Multi-Objective Simulation Optimization: A Case Study in Healthcare Management. *International Journal of Industrial Engineering*, 13 (2): 156-165.
- Baesler, F., Araya, E., Ramis, F., & Sepúlveda, J. (2004).** The Use of Simulation and Design of Experiments for Productivity Improvement in the Sawmill Industry. Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference. Washington, Estados Unidos, R.G. Ingalls, M.D. Rossetti, J.S. Smith, y B.A. Peters Eds., 2004. pp. 1218-1221.
- Baesler, F., Janhsen, H. & Dacosta M. (2003).** The Use of Simulation and Design of Experiments for Estimating Maximum Capacity in an Emergency Room. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference. New Orleans, Estados Unidos, S. Chick, P.J. Sánchez, D. Ferrin, y D.J. Morrice Eds., 2003. pp. 1903-1906.
- Bowdwn, R. & Hall, J. (1998).** Simulation Optimization Research and Development. Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference. Washington, Estados Unidos, D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson M.S. Manivannan Edsa. 1998. pp. 1693-1698.
- Carson, Y., & Maria A. (1997).** Simulation Optimization: Methods and Application. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference. Atlanta, Estados Unidos, S. Andradóttir, K.J. Healy, D.H. Withers, y B.L. Nelson Eds., 1997. pp. 118-126.
- Ferris, M., Munson. T. & Sinapiromsaran, K. (2000).** A Practical Approach to Sample-Path Simulation Optimization. Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference. Orlando, Estados Unidos, J.A. Jones, R.R. Barton, K. Kang, y P.A. Fishwick Eds., 2000. pp. 795-804.
- Fu, M., Glover, F., & April, J. (2005).** Simulation Optimization: a Review, New Developments, and Applications. Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. Orlando, Estados Unidos, M.E. Kuhl, N.M. Steiger, F.B. Armstrong, y J.A. Joines Eds., 2005. pp. 83-95
- Gurkan, G., Ozge, G., Yonca, A. & Robinson, S. (1999).** Solving Stochastic Optimization Problems With Stochastic Constraints: An Application In Network Design” Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference. Phoenix, Estados Unidos, P.A.Farrington, H.B. Nembhard, D.T. Sturrock, y G.W. Evans Eds., 1999. pp. 471-478.
- Hartmann, S. (2004).** Generating Scenarios for Simulation and Optimization of Container Terminal Logistics. *OR Spectrum*, 26, 171-192.
- Hutchinson, D. & Hill, S. (2001).** Simulation Optimization of airline delay with constraints. Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. Arlington, Estados Unidos, B.A. Peters, J.S. Smith, D.J. Medeiros, y M.W. Rohrer Eds., 2001. pp. 1017-1022.
- Kim, S. (2006).** Gradient-Based Simulation Optimzation. Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. Monterey, Estados Unidos, L.F. Perrone, F.P. Wieland, J. Liu, B.G. Lawson, D.M. Nicol, y R.M. Fujimoto Eds., 2006. pp.159-167.
- Klassen, K., & Yoogalingam, R. (2009).** Improving Performance in Outpatient Appointment Services with a Simulation Optimization Approach. *Production and Operations Management*, 18(4), 447-458.
- Lee, L., Chew, E., Tan, K., Huang, H., Lin, W., Han, Y. & Chan, T. (2007).** A Simulation Study on the Uses of Shuttle Carriers in the Container Yard” Proceedings of the 2007 Winter Simulation

Conference. Washington Estados Unidos, S.G. Henderson, B. Biller, M.-H. Hsieh, J. Shortle, J.D. Tew t R.R. Barton Eds., 2007. pp. 1994-2002.

**Lee, L., Chew, H., Peng, E. & Teng, S. (2006).** Integration of statistical selection with search mechanism for solving multi-objective simulation-optimization problems. Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. Monterey, Estados Unidos, L.F. Perrone, F.P. Wieland, J. Liu, B.G. Lawson, D.M. Nicol, y R.M. Fujimoto Eds., 2006. pp. 294-303.

**Morrice, D., Butler, J. & Mullarkey, P. (1998).** An approach to ranking and selection for multiple performance measures. Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference. Washington, Estados Unidos, D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson M.S. Manivannan Edsa. 1998. pp. 719-725.

**Sacone, S., & Siri, S. (2009).** An integrated simulation-optimization framework for the operational planning of seaport container terminal. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 15(3), 275-293.

**Sanchez, S., Moeeni, F., & Sanchez, P. (2010).** So Many Factors, So Little Time. A Frequency Domain Approach for Factor Screening, *International Journal of Production Economics*, in press.

**Swisher, J. & Jacobson, S. (1999).** A Survey of Ranking, Selection and Multiple Comparison Procedures for Discrete-Event Simulation. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference. Farrington, P.A., Nembhard, H.B., Sturrock, D.T., & Evans, G.W. Eds., 1999. pp. 492-501. Phoenix, Estados Unidos,

**Van Rensburg, J., He, J., & Kleywegt, A. (2005).** A Computer Simulation Model of Container Movement by Sea. Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. Orlando, Estados Unidos, M.E. Kuhl, N.M. Steiger, F.B. Armstrong, y J.A. Joines Eds., 2005. pp. 1559-1566.

**Yalcinkaya, O., & Bayhan, G. (2009).** Modeling and optimization of average travel time for a metro line by simulation and response surface methodology. *European Journal of Operational Research*, 196(1), 225-233.

**Zeng, Q., & Yang, Z. (2009).** Integrating simulation and optimization to schedule loading operations in container terminals. *Computers & Operations Research*, 36(6), 1935-1944.

**Zhang, H., Jiang, Z., & Guo, C. (2009).** Simulation-based optimization of dispatching rules for semiconductor wafer fabrication system scheduling by the response surface methodology. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(1-2), 110-121.