

Pontificia Universidad Católica del Perú

Facultad de Ciencias e Ingeniería



DIAGNOSTICO Y MEJORA DE PROCESOS PARA LA REDUCCIÓN DE LA TASA DE OCUPACIÓN DE UN MUELLE

Tesis para optar el Título de Ingeniero Industrial, que presentan los
bachilleres:

Pablo Sanz Zegarra

Omar André Arribasplata Zavala

ASESOR: Eduardo Carbajal López

Lima, mayo del 2013

RESUMEN

En el presente trabajo se describe el análisis, diagnóstico, desarrollo del modelo de simulación discreta y propuesta de mejora en el proceso de carga y descarga de contenedores en el Muelle XYZ del Puerto ABC, en busca de reducir su tasa de ocupación ya que presenta valores mayores a los permitidos por la Autoridad Portuaria Nacional (APN).

El uso de la simulación de eventos discretos permitió desarrollar un modelo que representa la realidad de los procesos de carga y descarga de contenedores, así como el flujo de estos dentro del patio de maniobras, con el fin de encontrar aquellos sub procesos en donde se generan mayores demoras y mediante la mejora de los mismos reducirlas. La mejora de procesos debe ser continua y sostenible ya que busca el perfeccionamiento de una empresa y del desempeño de sus procesos.

En el análisis de datos se trabajó con data real obtenida de la medición de tiempos y brindada por sistemas internos de la empresa, cuanto más precisa sea esta medición más beneficiosa será para la toma de decisiones; ya que lo que se busca con esta es encontrar una función estadística que se adecúe a cada uno de los subprocesos para que los tiempos de operación y demora de las entidades sean precisos y de esta manera puedan reflejar la realidad.

El modelo de simulación debe reflejar al mayor detalle posible como es que se desarrolla el proceso en la realidad, tomando en cuenta todos los eventos que se puedan presentar aún cuando estos tengan poca probabilidad de ocurrencia. Luego de tener el modelo de simulación se valida que los resultados obtenidos sean cercanos a la realidad, para lo cual estos deben encontrarse dentro de un intervalo de confianza y además mantener ciertas condiciones que permitan truncar periodos de calentamiento.

Finalmente con toda la información obtenida se generó un modelo de optimización el cual contiene restricciones de operación y una función objetivo de minimización de tiempos en muelle. El resultado obtenido es la solución óptima que generará mejoras en el flujo del proceso.

Dedicatoria

A mis padres por todo su apoyo a lo largo de este proceso, a Omar por su dedicación y a Eduardo por su gran ayuda en este trabajo de investigación.

(Pablo Sanz)

A mis papás por el apoyo incondicional de toda la vida, a Pablo por su paciencia y el trabajo en equipo y a Eduardo por todo el tiempo y la ayuda brindada.

(Omar Arribasplata)



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. Simulación de Sistemas	3
1.1.1. Definición.....	3
1.1.2. Componentes de un sistema	4
1.1.3. Modelo de un sistema	5
1.1.4. Pasos para el estudio con simulación.....	6
1.2. Simulación de eventos discretos.....	7
1.2.1. Definición.....	7
1.2.2. Análisis de datos	7
1.3. Software arena	11
1.3.1. Definición.....	11
1.3.2. Conceptos básicos	11
1.3.3. Bloques y elementos	12
1.3.4. Optquest.....	14
1.4. Herramientas estadísticas para el análisis de datos.....	14
1.4.1. Análisis de la varianza (ANOVA)	14
1.4.2. Distribución F (de Fisher).....	17
CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL.....	19
2.1. Descripción de la empresa.....	19
2.1.1. La empresa en Perú.....	19
2.2. Descripción de la problemática	22
2.3. Diagnóstico.....	24
2.3.1. Datos generales	24
2.3.2. Estadísticas de la empresa	25
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO.....	29
3.1. Supuestos para establecer el modelo.....	29
3.2. Componentes del modelo	29
3.2.1. Entidades	29
3.2.2. Atributos	30
3.2.3. Recursos	31
3.2.4. Colas	32
3.2.5. Estaciones.....	33
3.2.6. Variables	34
3.3. Diseño del modelo	34

3.3.1.	Simulación de la llegada de los buques portacontenedores	34
3.3.2.	Simulación del proceso de amarre de los buques porta contenedores.....	35
3.3.3.	Simulación del proceso de descarga de contenedores	36
3.3.4.	Simulación del proceso de carga de contenedores	37
3.3.5.	Simulación del proceso de zarpe de los buques portacontenedores	38
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE DATOS		39
4.1.	Análisis de varianza entre los datos	39
4.2.	Determinación de las distribuciones estadísticas	40
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS		45
5.1.	Análisis de resultados	45
5.1.1.	Análisis de resultados de los principales indicadores.....	45
5.1.2.	Calculo de la longitud de réplica adecuada	47
5.2.	Validación de resultados	52
5.2.1.	Número de naves atendidas	52
5.2.2.	Número de contenedores movilizados.....	54
5.2.3.	Tiempo total de atención de las naves.....	55
CAPÍTULO 6. PROPUESTA DE MEJORA.....		60
6.1.	Controles del sistema.....	60
6.2.	Restricciones para la optimización.....	61
6.3.	Planteamiento de la función objetivo	62
6.4.	Solución en OptQuest	62
CAPÍTULO 7. EVALUACIÓN ECONÓMICA.....		64
7.1.	Estimación de costos de implementación de las mejoras propuestas	64
7.1.1.	Costos de preparación del modelo	64
7.1.2.	Costo de implementación de las mejoras propuestas	65
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		66
8.1.	Conclusiones.....	66
8.2.	Recomendaciones	67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Distribuciones a emplear en el trabajo.....	9
Tabla 2: Tabla ANOVA 1 vía.....	15
Tabla 3: Tabla ANOVA Resumen de Cálculos	16
Tabla 4: Recursos Terminal Muelle XYZ	21
Tabla 5: Costo y Ahorro por servicio.....	22
Tabla 6: Naves recibidas en el TPC	23
Tabla 7: Tiempo de estadía – TEUS movilizados.....	26
Tabla 8: Promedio Mensual de buques y tipo de operación.....	29
Tabla 9: Atributos del Sistema	30
Tabla 10: Recursos Comunes	31
Tabla 11: Descripción de Colas	32
Tabla 12: Estaciones.....	33
Tabla 13: Variables	34
Tabla 14: Resultados prueba ANOVA, atraque de naves	39
Tabla 15: Resultados prueba ANOVA, zarpe de naves	40
Tabla 16: Resultados <i>Data Summary</i> , distribución de los tiempos entre llegadas de las embarcaciones.....	42
Tabla 17: Resultados pruebas Chi cuadrado y Kolgomorov Smirnov, distribución de los tiempos entre llegadas de las embarcaciones.....	42
Tabla 18: Elección mejor distribución de probabilidad, distribución de los tiempos entre llegadas de las embarcaciones.....	43
Tabla 19: Distribución estadística de los tiempos (minutos) entre llegadas de las embarcaciones.....	43
Tabla 20: Distribuciones estadísticas de la cantidad de contenedores por embarcación.....	44
Tabla 21: Distribuciones estadísticas de los tiempos (minutos) de todas las operaciones del muelle.....	44
Tabla 22: Resultados de los tiempos (minutos) de estadía de naves por amarradero	45
Tabla 23: Resultados de número de naves atendidas y contenedores movilizados.....	46
Tabla 24: Resultados de las utilizaciones de las grúas RTG	46
Tabla 25: Resultados del primer agrupamiento del Amarradero 1	48
Tabla 26: Resultados del segundo agrupamiento del Amarradero 1	48
Tabla 27: Resultados del primer agrupamiento del Amarradero 2.....	50
Tabla 28: Resultados del segundo agrupamiento del Amarradero 2	51
Tabla 29: Resultados de la cantidad de naves atendidas	53
Tabla 30: Demanda satisfecha mensual.....	53
Tabla 31: Resultados de la cantidad de contenedores movilizados.....	54
Tabla 32: Contenedores movilizados mensualmente.....	55

Tabla 33: Resultados del primer agrupamiento del Amarradero 1 (LR óptima)	56
Tabla 34: Resultados del segundo agrupamiento del Amarradero 1 (LG óptima)	57
Tabla 35: Resultados del primer agrupamiento del Amarradero 2 (LR óptima)	58
Tabla 36: Resultados del segundo agrupamiento del Amarradero 2 (LG óptima)	58
Tabla 37: Solución óptima.....	62
Tabla 38: Costo de preparación del Modelo	64
Tabla 39: Costo de implementación de las mejoras prop. (valores solarizados, tipo de cambio 2.58)	65



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Proceso de Simulación de Sistemas	6
Figura 2: Esquema de conectividad entre bloques.....	12
Figura 3: Proceso de Importación.....	20
Figura 4: Proceso de Exportación.....	21
Figura 5: Tasa de Ocupabilidad vs Standard.....	23
Figura 6: Naves recibidas en los terminales portuarios.....	24
Figura 7: Tiempo de estadía de las naves en los terminales portuarios	25
Figura 8: Total de TEUS movilizados	26
Figura 9: Movimiento promedio por nave	27
Figura 10: Tiempo promedio para el inicio de la descarga y el zarpe	28
Figura 11: Bloques de creación, asignación y división de flujo de buques	35
Figura 12: Bloques de atraque de buques en amarraderos	36
Figura 13: Bloques de simulación del proceso de descarga	37
Figura 14: Bloques de simulación del proceso de carga	38
Figura 15: Bloques de simulación del proceso de zarpe	38
Figura 16: Distribución de los tiempos entre llegadas de las embarcaciones.....	41
Figura 17: Evolución del tiempo de atención de las naves en el Amarradero 1.....	47
Figura 18: Evolución del tiempo de atención de las naves en el Amarradero 2.....	50

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el Perú cuenta con un crecimiento significativo en el ámbito relacionado al comercio exterior. Desde el inicio de sus operaciones el terminal de contenedores Muelle XYZ redujo los tiempos de operación; sin embargo el crecimiento del flujo de contenedores ocasionó un aumento en la tasa de ocupación que supera los niveles permitidos por la Autoridad Portuaria Nacional (APN). En el presente estudio se utiliza la simulación de eventos discretos para desarrollar un modelo que permita encontrar una optimización en los procesos de carga y descarga de contenedores y reducir, de esta manera, los niveles de utilización en el muelle.

En el capítulo 1 del presente trabajo se definen los conceptos teóricos de las herramientas utilizadas para su desarrollo. La principal herramienta utilizada es la simulación de sistemas; específicamente simulación de eventos discretos la cual se lleva a cabo mediante el *software* Arena. Este *software* cuenta con herramientas internas que permiten aproximar datos a funciones estadísticas y validar los resultados y finalmente obtener un modelo de optimización. Además se definen las herramientas estadísticas utilizadas para el análisis de datos como ANOVA y las pruebas de hipótesis.

En el capítulo 2 se describe a la empresa, sus procesos y los servicios que brinda. Así mismo se describe la problemática actual; además, basándose en estadísticas actuales de la empresa se realiza un diagnóstico, el cual servirá como base para el estudio de los puntos posteriores.

En el capítulo 3 se establecen los supuestos del modelo, así como todos los componentes del mismo describiéndose la funcionalidad de cada uno de ellos, también se definen los nombres que reciben cada uno de estos elementos dentro del modelo y que representan. Además se describe la lógica de cada subproceso definido dentro del modelo los cuales componen el flujo general del proceso.

En el capítulo 4 se realiza el análisis de datos de entrada del modelo, el cual consiste en, mediante una muestra relevante de datos por cada operación realizada, estimar una función estadística que se ajuste a los tiempos en la realidad para poder ser ingresadas dentro del modelo de simulación.

En el capítulo 5 se procede a analizar los resultados obtenidos de la simulación; además se valida que estos se ajusten a la realidad para luego en el capítulo 6 encontrar una propuesta de mejora óptima definiendo los parámetros necesarios.

En el capítulo 7 se realiza una evaluación económica y se contabiliza el costo que conlleva realizar la propuesta presentada.



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1. Simulación de Sistemas

1.1.1. Definición

Según Banks (2010), simular consiste en la imitación de las operaciones de un proceso o sistema real en el tiempo, esta puede ser realizada a mano o por computadora. La simulación incluye la generación de un modelo artificial de un sistema y obtener conclusiones de las características de operación del sistema real basadas en la observación del modelo. Al modelo, normalmente, se le va dando forma con supuestos relacionados a las operaciones del sistema; estos supuestos pueden ser expresados de forma matemática, lógica y simbólicamente y reflejan las relaciones entre los objetos de interés del sistema. Luego que un modelo es validado puede servir para la experimentación y planteamiento de mejoras de un sistema real.

Para Pedgen (1990), la simulación es el proceso de diseño de un modelo real para realizar experimentos sobre este y, con los resultados obtenidos, entender el modo de operación y comportamiento del sistema.

Si bien la simulación de sistemas no es una herramienta que permita, por si sola, la optimización de las operaciones de un sistema; se puede utilizar para optimizar ya que permite estudiar el impacto de los cambios que puedan aplicarse a los sistemas reales.

A continuación se definirán las ventajas y desventajas que se presentan al desarrollar un modelo de simulación de sistemas:

- Ventajas
 - Nuevos diseños de planta, transporte, operación, entre otros pueden analizarse sin necesidad de comprometer recursos en su adquisición.
 - Permite entender de cómo funciona un sistema en su totalidad.
 - Con el avance de la tecnología se puede llegar a modelar sistemas a un nivel alto de exactitud y con alta velocidad lo cual permite analizar estos con mayor detalle.

- Permite el análisis de un proceso a profundidad en tiempos reducidos.
- Ahorro de dinero, generalmente es más económico mejorar un proceso vía simulación que de manera real.
- Explorar nuevos procedimientos operativos sin tener que interrumpir el original.

- Desventajas
 - El costo para el desarrollo de un modelo puede ser alto.
 - El desarrollo de un modelo de simulación puede demandar mucho tiempo.
 - Algunos sistemas se ven afectados por eventos incontrolables lo que hace que su simulación no sea posible.
 - Dificultad para el análisis de resultados.

1.1.2. Componentes de un sistema

Para poder analizar y entender de manera adecuada un sistema existen una serie de términos que deben ser definidos; de esta forma se tendrá un lenguaje adecuado sobre los elementos que se utilizan dentro de una simulación.

- Sistema.- Grupo de entidades que interactúan juntas en el tiempo para lograr uno o más objetivos.
- Modelo.- Representación de un sistema que contiene relaciones estructurales, lógicas y/o matemáticas que definen al sistema en términos de entidades, procesos, eventos, demoras, atributos, actividades y estados.
- Variables de Estado.- Variables con la información necesaria para describir al sistema en cualquier momento.
- Entidad.- Componente en un sistema que requiere representación explícita en un sistema. (Ejemplo: clientes, máquinas, etc.)
- Atributos.- Propiedades dadas a una entidad (Ejemplo: prioridad de atención)
- Cola.- Conjunto de entidades asociadas y ordenadas de alguna manera lógica.
- Evento.- Ocurrencia instantánea que cambia el estado de un sistema (Ejemplo: la llegada de un nuevo cliente al sistema)
- Demora.- Duración del tiempo.
- Recursos.- Necesidades que requieren las entidades a través de la simulación.

1.1.3. Modelo de un sistema

Como se mencionó en líneas anteriores un modelo es definido como la representación de un sistema con el propósito de estudiarlo; por definición es la simplificación del sistema, pero por otro lado debe estar lo suficientemente detallado lo cual permita extraer conclusiones válidas sobre el sistema real. Diferentes modelos de un mismo sistema pueden ser requeridos con el propósito de evaluar distintos cambios dentro de la investigación.

Al igual que un sistema, la representación de un modelo incluye entidades, atributos y actividades. Sin embargo el modelo contiene solo aquellas que son relevantes en el estudio.

a) Tipos de modelos

Los modelos pueden ser clasificados como matemáticos o físicos. Un modelo matemático usa notación simbólica y ecuaciones matemáticas para representar un sistema; un modelo de simulación de sistemas es un caso particular de modelo matemático.

Además los modelos de simulación pueden ser clasificados como estáticos o dinámicos. Un modelo estático es la representación de un sistema en un punto particular en el tiempo. Los modelos dinámicos de simulación representan el cambio en el tiempo de un sistema.

Por otro lado los modelos que no contienen variables aleatorias pueden clasificarse como modelos deterministas; estos modelos tienen un conjunto de entradas conocidas que dan como resultado un único conjunto de salidas. Existen también modelos estocásticos, los cuales tienen una o más variables aleatorias como entradas las cuales llevan a salidas aleatorias. En vista que las salidas son aleatorias, estas pueden ser consideradas solo como estimaciones de las verdaderas características del sistema.

Por lo tanto para el desarrollo de la investigación se empleara un modelo dinámico, estocástico y discreto.

1.1.4. Pasos para el estudio con simulación

Para realizar un correcto estudio con simulación primero se debe identificar y definir el problema a atacar, acto seguido se deben trazar los objetivos a los cuales se desea llegar con los resultados obtenidos de la simulación.

Luego se debe realizar una correcta recolección de datos una vez revisado el modelo se procede a diseñar experimentos que reflejen como ocurre el proceso en la realidad.

Posteriormente se procede a correr el modelo hasta que los resultados obtenidos sean coherentes con el proceso real; una vez obtenidos estos resultados se procede a documentarlos para finalmente presentarlos.

Los pasos para el estudio de simulación se encuentran en la Figura 1

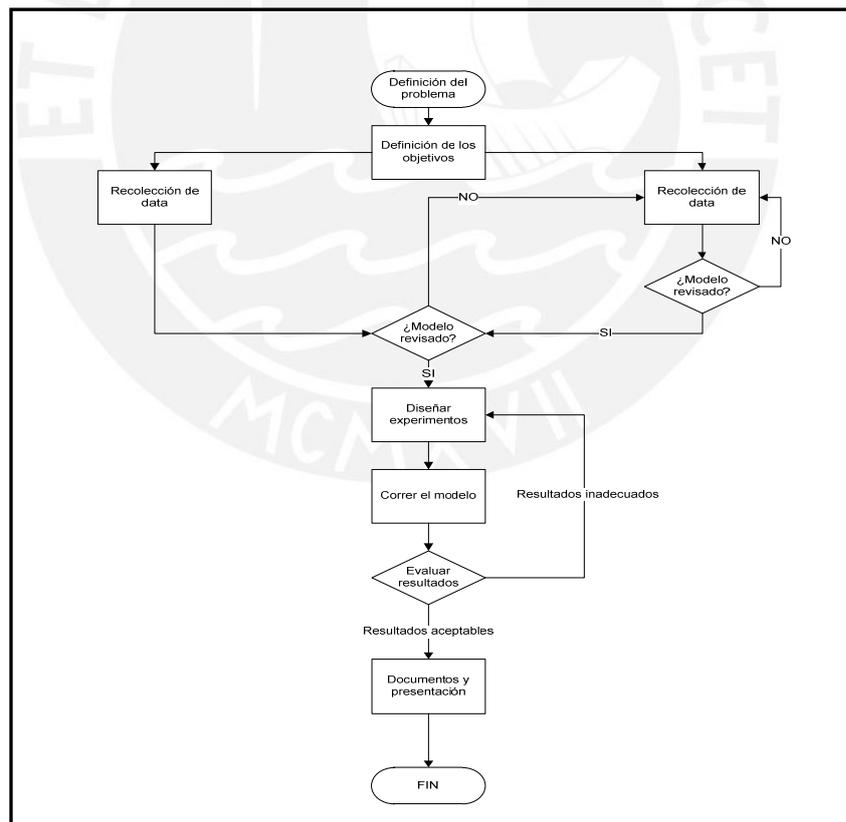


Figura 1: Proceso de Simulación de Sistemas

Fuente: Banks (2010); elaboración propia

1.2. Simulación de eventos discretos

1.2.1. Definición

La simulación de eventos discretos es una simulación en la cual las variables de estado tienen cambios discretos, en eventos definidos y se tienen mayoritariamente variables estocásticas para describir las entradas en el tiempo. El análisis para la simulación de estos modelos se da de forma numérica en lugar de utilizar métodos analíticos. Los métodos numéricos emplean procesos computacionales para resolver modelos matemáticos. En el caso de modelos de simulación, en los cuales se emplea métodos matemáticos, los modelos son “corridos” en lugar de resueltos, esto debido a que la historia artificial del sistema es generada a raíz de los supuestos del modelo.

1.2.2. Análisis de datos

a) Recolección de datos

Para realizar una correcta recolección de datos, se debe tomar en cuenta un tamaño de muestra aleatoria adecuado; debido a que se trata de una estimación se debe considerar un error de muestreo y un nivel de confianza. A continuación se definirán conceptos estadísticos básicos y las fórmulas necesarias para determinar el tamaño de muestra adecuado.

- Probabilidad: Experimento aleatorio realizado a través de pruebas una o múltiples veces con un resultado no predecible siempre. El experimento puede ser determinista o aleatorio y se obtendrá normalmente como resultado un número entre 0 y 1.
- Población: Es el conjunto de elementos de referencia sobre el que se realizan las observaciones.
- Muestra Aleatoria: Conjunto de elementos pertenecientes a una población con la misma probabilidad de ser incluidos en una muestra.
- Estadísticas: Cualquier función relacionada a las variables aleatorias que constituyen una muestra.

Estadísticas Importantes:

- Media Muestral:
$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$
- Varianza Muestral:
$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$
- Desviación Muestral:
$$s = \sqrt{s^2}$$
- Proporción Muestral:
$$\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

Para obtener los tamaños de muestra adecuados según el tipo de población se utilizarán las siguientes fórmulas:

- Población Infinita:
$$n = \frac{(Z_{1-\frac{\alpha}{2}})^2 s^2}{e^2}$$
- Población Finita:
$$n = \frac{N(Z_{1-\frac{\alpha}{2}})^2 s^2}{e^2(N-1) + (Z_{1-\frac{\alpha}{2}})^2 s^2}$$

Donde:

- $Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ es el valor obtenido por la distribución normal.
- s es la desviación estándar de la muestra.
- e es el error o precisión que se desea.
- α es el nivel de confiabilidad.
- N es el tamaño de la población conocida.

De igual manera se pueden utilizar proporciones para determinar el tamaño de muestra.

- Población Infinita:
$$n = \frac{Z_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 pq}{e^2}$$
- Población Finita:
$$n = \frac{NZ_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 pq}{e^2(N-1) + Z_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 pq}$$

Donde:

- p es la proporción esperada.

- q es el complemento de p ($q = 1 - p$)

b) Identificación de las distribuciones

Con el fin de seleccionar la distribución que mejor representa al conjunto de datos se generan histogramas de frecuencias que permitan ver el ajuste.

Existen cientos de distribuciones de probabilidad estadística, a continuación se presentarán las distribuciones que serán empleadas a lo largo desarrollo de la investigación:

Tabla 1: Distribuciones a emplear en el trabajo

Distribuciones Discretas	Distribuciones Continuas
Geométrica	Uniforme
Binomial	Gamma
Poisson	Triangular
	Weibull
	Exponencial
	Normal
	Erlang
	Lognormal
	Beta
	Johnson

Fuente: Input Analyzer; elaboración propia

c) Pruebas de bondad de ajuste

El paso siguiente es realizar las pruebas de bondad de ajuste con la intención de seleccionar la mejor distribución conocida que represente a los datos si se rechaza se debe crear una distribución específica representar el comportamiento los datos denominada distribución empírica.

Se realizarán las siguientes pruebas de bondad de ajuste:

- Chi-cuadrado:

Aplicable a distribuciones continuas y discretas con tamaño de muestra mayor o igual a 90.

La prueba requiere que las n observaciones se organicen en k categorías. El estadístico de la prueba es el siguiente:

$$X_{\chi^2} = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

Donde:

- O_i es la frecuencia observada en cada categoría.
- E_i es la frecuencia esperada en cada categoría.

Las hipótesis utilizadas en la prueba son las siguientes:

H_0 : La variable aleatoria x , se ajusta a la distribución planteada

H_1 : La variable aleatoria X , no se ajusta a la distribución planteada

El valor crítico de la prueba es $X_{\alpha, k-s-1}^2$. Se rechaza la hipótesis nula H_0 si $X_{\chi^2} > X_{\alpha, k-s-1}^2$.

- Kolmogorov-Smirnov:

Aplicable a distribuciones continuas sin importar el tamaño de muestra.

La prueba requiere ordenar de forma ascendente los datos recolectados y calcular para cada uno de ellos lo siguiente:

$$D^+ = \frac{i}{N} - R_{(i)}$$

$$D^- = R_{(i)} - \frac{i-1}{N}$$

Y se registra $D = \max \{ (D^+); (D^-) \}$.

Las hipótesis utilizadas en la prueba son las siguientes:

H_0 : La variable aleatoria X , se ajusta a la distribución planteada

H_1 : La variable aleatoria X , no se ajusta a la distribución planteada

El valor crítico de la prueba es D . Se rechaza la hipótesis nula H_0 si $\max \{ (D^+); (D^-) \} > D$.

d) Validación de resultados

La validación es el proceso de determinar si el modelo, como abstracción, es una buena representación del sistema real.

Para ello se plantea la siguiente prueba de hipótesis:

Partimos sabiendo que en sistema real el promedio de la variable Y es una constante c.

$$H_0: E(Y) = c$$

$$H_1: E(Y) \neq c$$

$$t_0 = \frac{E(Y) - C}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

Se calcula el estadístico $t_0 = \frac{E(Y) - C}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$, donde n es el tamaño de muestra y S es la desviación estándar de la muestra, que se calcula de la siguiente manera:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - E(Y))^2}{n - 1}}$$

Se rechaza la hipótesis nula si $|t_0| > t_1(\alpha/2, n - 1)$

1.3. Software arena

1.3.1. Definición

Arena es un software de simulación desarrollado por Rockwell Automation, que nos permitirá simular procesos, analizar indicadores de desempeño y evaluar los efectos de posibles cambios en el modelo.

Utilizar un software como este nos permite poder visualizar los resultados de cambios específicos sin necesidad de implementarlos en tiempo real, ahorrando tiempo y recursos.

1.3.2. Conceptos básicos

a) Flujo de entidades entre bloques

El flujo de entidades en Arena es controlado por conectores, que transfieren una entidad desde un punto fuera de un bloque (*exit point*) hasta un punto de entrada (*entry point*) de otro bloque y su representación grafica en la figura 2:

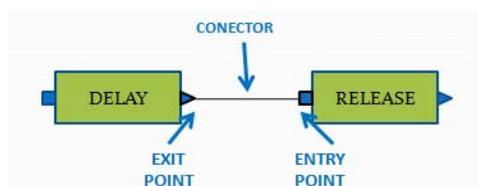


Figura 2: Esquema de conectividad entre bloques
Fuente: Simulation with Arena (KELTON, 2008)

b) Condiciones de funcionamiento para los bloques

Son las condiciones (*operands*) que necesitan ser especificados para el correcto funcionamiento de cada bloque.

Existen operands obligatorios y opcionales, los obligatorios no tienen un valor por defecto y necesariamente se deben indicar, los opcionales se especifican sólo cuando se desea cambiar el valor por defecto pre establecido.

1.3.3. Bloques y elementos

a) Bloques

Los principales bloques que se utilizarán en el modelo del presente trabajo son los siguientes:

- *Create*: Se emplea para modelar la llegada de entidades al sistema. Las entidades entran secuencialmente de acuerdo a la distribución determinada.
- *Queue*: Espacio de espera para las entidades cuyo movimiento ha sido suspendido, simula una cola.
- *Seize*: Asigna un recurso específico a una entidad
- *Delay*: Representa el tiempo que una entidad está relacionada con una entidad y por lo general corresponde a la demora por el servicio o actividad.
- *Release*: Realiza la des asignación del recurso para que pueda ser asignado a la siguiente entidad.
- *Dispose*: Modela la salida de las entidades del sistema.
- *Tally*: Permite calcular estadísticas relacionadas a la variable tiempo, como por ejemplo el tiempo que cada entidad permanece en el sistema.
- *Count*: Cuenta la ocurrencia de algunos eventos.
- *Assign*: Permite asignar valores a variables o atributos de las entidades.
- *Branch*: Permite controlar el flujo de las entidades direccionándolas por ramas.
- *Duplicate*: Permite crear un determinado número de clones de una entidad original, conservando todos los atributos de la original.
- *Group*: Permite agrupar un determinado número de entidades de forma temporal o permanente.
- *Split*: Permite una división de una entidad constituida por una agrupación temporal.

- *Scan*: Detiene el flujo de entidades hasta que se cumpla una determinada condición.
- *Signal*: Cuando una entidad pasa por este bloque se emite una señal, por lo general se usa con el bloque *Wait* para coordinar liberaciones simultáneas.
- *Wait*: Detiene el flujo de entidades hasta recibir una señal específica emitida por el bloque *Signal*.
- *Store*: Permite representar el almacenamiento de entidades en un determinado *Storage*.

b) Elementos

Los principales elementos que se utilizarán en el modelo del presente trabajo son los siguientes:

- *Project*: Permite generar un reporte al final de cada réplica, incluye un resumen estadístico de las variables de respuesta seleccionadas.
- *Replicate*: Controla el número de réplicas, longitud y opciones de inicialización de cada réplica.
- *Queues*: En este elemento se definen las colas empleadas en el modelo, incluye información sobre el nombre, número y políticas de cola.
- *Resources*: Se definen los recursos que serán empleados en el modelo, incluye información sobre el nombre y capacidad de los mismos.
- *Tallies*: Provee información descriptiva acerca de los registros de *Tally*, incluyendo nombre, número y opcionalmente el archivo de salida generado (*output file*).
- *Attributes*: Se definen los nombres y propiedades de variables locales y atributos.
- *Counter*: En este elemento se definen los contadores empleados en el modelo.
- *Variables*: Se definen en este elemento los nombres y propiedades de variables globales.
- *Dstats*: Sirve para grabar datos acerca de variables dependientes del tiempo, puede generar grabaciones estadísticas de una o más variables.
- *Storages*: Especifica el número total de almacenajes y sus nombres, también permite guardar grabar estadísticas de utilización individual de un recurso por cada tipo de trabajo de existe.
- *Schedules*: Permite definir diferentes capacidades para los recursos de acuerdo a intervalos de tiempo definidos.

- *Failures*: Permite definir fallas vinculadas a los recursos.

1.3.4. Optquest

OptQuest es una herramienta de Arena que permite buscar soluciones óptimas, ya sea maximizando o minimizando un objetivo predefinido, buscando los mejores valores para un conjunto de controles o recursos. Los tres principales elementos de un modelo de optimización son los controles, las restricciones y el objetivo.

- Los controles (*controls*), son variables de Arena o recursos que pueden ser manipulados para afectar al rendimiento de un sistema simulado, por ejemplo, la cantidad de producto a realizar, el número de trabajadores para asignar a una actividad, o el tamaño de la flota en un sistema de transporte.
- Las respuestas o resultados (*responses*), debido a que la función objetivo y las restricciones pueden depender de resultados de la simulación, y por lo tanto, se basan en las respuestas, estas respuestas que incluyen recuentos, salidas, *CStats* y *DStats*, contadores, y las variables se definen como respuestas.
- Las restricciones (*constrains*), son las relaciones entre los controles y/o resultados (*responses*). Por ejemplo, una restricción podría asegurar que la cantidad total de dinero asignado entre diversas inversiones no puede superar una cantidad determinada.
- Objetivo (*objective*), es una representación matemática de la meta del modelo (en términos de los resultados y controles); el objetivo es o bien a minimizar o maximizar esta cantidad. El trabajo de OptQuest es encontrar el valor óptimo del objetivo mediante la mejor selección de diferentes valores para los controles. Cuando los datos del modelo son inciertos y sólo puede ser descrito mediante distribuciones de probabilidad, el objetivo en sí tendrá alguna distribución de probabilidad para cualquier conjunto de valores de los controles.

1.4. Herramientas estadísticas para el análisis de datos

1.4.1. Análisis de la varianza (ANOVA)

El ANOVA utiliza una sola variable numérica medida en los elementos de la muestra con el interés de probar la igualdad entre las medias de los k tratamientos realizados; este análisis divide la variabilidad total de los datos contenidos en la

muestra en dos componentes. Así la prueba de hipótesis se basa en la comparación de dos estimaciones independientes de la variabilidad de la población. La tabla 2 representa un ANOVA de una vía.

a) Diseño de los datos para una ANOVA de una vía

Tabla 2: Tabla ANOVA 1 vía

X: Variable dependiente
Datos de k muestras aleatorias independientes

	Niveles o Tratamientos de un Factor A						Sumas
	1	2	...	i	...	k	
	X_{11}	X_{21}	...	X_{i1}	...	X_{k1}	
	X_{12}	X_{22}	...	X_{i2}	...	X_{k2}	
	
	X_{1m_1}	X_{2m_2}	...	X_{im_i}	...	X_{km_p}	
Sumas	$X_{1\bullet}$	$X_{2\bullet}$...	$X_{i\bullet}$...	$X_{k\bullet}$	
n_i	n_1	n_2	...	n_i	...	n_k	n
Medias	$\bar{X}_{1\bullet}$	$\bar{X}_{2\bullet}$...	$\bar{X}_{i\bullet}$...	$\bar{X}_{k\bullet}$	$\bar{X}_{\bullet\bullet}$

Fuente: Estadística Aplicada (Córdova, 2008); elaboración propia

Sea X una variable aleatoria que se observa en k-niveles de un factor A

- Se supone que:
- $X_{ij} \sim N(\mu_i, (\sigma^2)_i)$ $i=1, 2, \dots, k$
 - $(\sigma^2)_1 = (\sigma^2)_2 = \dots = (\sigma^2)_k = (\sigma^2)$
 - X_i y X_j independientes

La media global μ es la media de X y su varianza (σ^2) es estimada por $SCT/(n-1)$, donde,

$$SCT = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_{\bullet\bullet})^2$$

b) La hipótesis de ANOVA

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu$ (son iguales las medias en k tratamientos)

$$X_{ij} = \mu_0 + \alpha_i + \epsilon_{ij}$$

$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_k = 0$ (son nulos los efectos de k tratamientos)

Contra

$\frac{H_1: \exists \mu_t \neq \mu}{\mu_t}$ (En al menos un tratamiento la media es diferente de la media global)

$\frac{H_1: \exists \alpha_t \neq 0}{\alpha_t}$ (No es nulo el efecto de al menos uno de los tratamientos)

c) Estadística de la prueba de hipótesis

Varb. Total (SCT) = Dentro de grupos (SCE) + Entre grupos (SCA)

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_{..})^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_i - \bar{X}_{..})^2$$

Grados de libertad: $n-1 = (n-k) + (k-1)$

Total:

$$SCT = (n-1)S_x^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}^2 - C, \text{ con } C = \frac{[X_{1..}]^2}{n}$$

$$SCA = \sum_{i=1}^k [n_i (X_i - \bar{X}_{..})^2] = \sum_{i=1}^k \frac{(X_i)^2}{n_i} - C$$

SCE = SCT – SCA

$$F = \frac{\frac{SCA}{(k-1)}}{\frac{SCE}{(n-k)}} = \frac{MCA}{MCE} \sim F(k-1, n-k)$$

$RC = \{F(k-1, n-k) > c\}$

En la tabla 3 se presenta el resumen de cálculos para una ANOVA

Tabla 3: Tabla ANOVA Resumen de Cálculos

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Medias Cuadráticas	Estadística F
Factor A (Entre grupos)	SCA	$k-1$	$MCA = \frac{SCA}{k-1}$	$F_{cat} = \frac{MCA}{MCE}$

Error (Dentro de grupos)	SCE	$n-k$	$MCE = \frac{SCE}{n-k}$	
Total	SCT	$n-1$		

Fuente: Estadística Aplicada (Córdova, 2008); elaboración propia

$$RC = \{F_{1-\alpha}(k-1, n-k) > F_{tabla}\}$$

1.4.2. Distribución F (de Fisher)

En estadística se prueban muchas hipótesis mediante el test F, entre ellas:

- a) La hipótesis de que las desviaciones estándar de dos poblaciones normalmente distribuidas son iguales.

H_1 : Alguna μ_i es diferente

Además la prueba F nos permite analizar el ratio de varianzas de dos poblaciones, con lo cual se plantea la siguiente prueba de hipótesis.

$$H_0: \sigma^2_1 = \sigma^2_2$$

$$H_a: \sigma^2_1 \neq \sigma^2_2$$

En donde σ^2_1 y σ^2_2 son las varianzas de cada una de las poblaciones.

En muchos casos, el test F puede resolverse mediante un proceso directo. Se requieren dos modelos de regresión, uno de los cuales restringe uno o más de los coeficientes de regresión conforme a la hipótesis nula. La distribución F con grados de libertad r_1 y r_2 es generado de una población normal por la variable:

$$F = \frac{\frac{X^2(\alpha)}{r_1}}{\frac{X^2(\alpha)}{r_2}} \sim F(r_1, r_2)$$

Si S^2_1 es la varianza de una muestra aleatoria de tamaño n_1 de $N(\mu_1, \sigma^2_1)$ y si S^2_2 es la varianza de una muestra aleatoria de tamaño n_2 de $N(\mu_2, \sigma^2_2)$ (independientes), entonces, se tiene:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i|}{\sum_{i=1}^n x_i} \approx F(n_1 - 1, n_2 - 1)$$



CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

2.1. Descripción de la empresa

La empresa fue formada en Setiembre del 2005 y opera en más de 60 terminales alrededor de seis continentes con el manejo de contenedores que genera alrededor del 80% de sus ingresos. Además, la compañía cuenta actualmente con 11 nuevos desarrollos y ampliaciones importantes en marcha en 10 países; con lo cual tiene como objetivo mejorar la eficiencia de la cadena de suministro de sus clientes mediante la gestión eficaz de los contenedores. La compañía constantemente invierte en la infraestructura de sus terminales, instalaciones y personas, trabajando estrechamente con los consumidores y aliados para poder proveer un servicio de calidad.

- **Visión**
Valor sostenible a través del crecimiento global, servicio y excelencia.
- **Misión**
Dar un enfoque global para un entorno empresarial local donde la excelencia, innovación y rentabilidad impulsen nuestra filosofía de negocio de un excepcional servicio al cliente.
- **Valores**
 - Compromiso con nuestra gente y clientes
 - Rentabilidad en el crecimiento global
 - Excelencia e innovación

2.1.1. La empresa en Perú

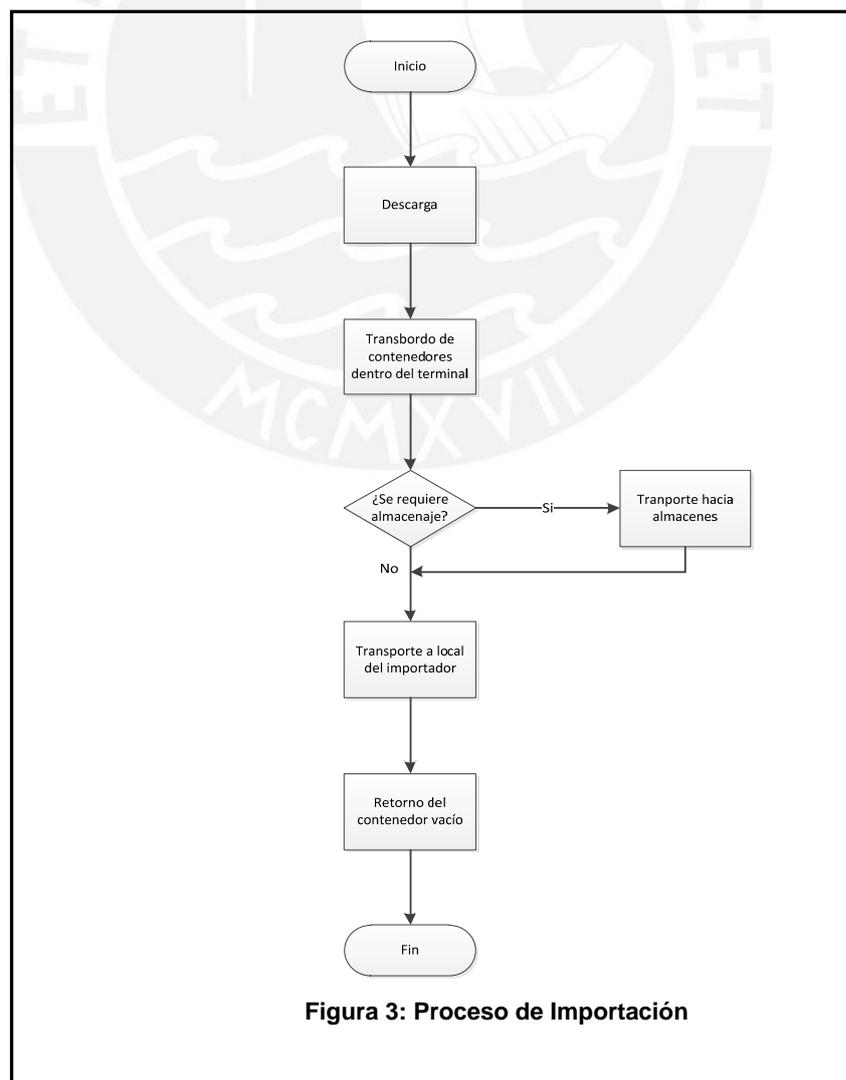
El terminal Muelle XYZ inició sus operaciones comerciales en Mayo del 2010, luego de haber firmado el contrato de concesión en el año 2006. Este nuevo terminal se encuentra diseñado específicamente para el tráfico de contenedores, tiene alta densidad operativa y alta productividad.

Su principal actividad es el embarque y descarga de contenedores en el terminal, esta se realiza las 24 horas del día los 365 días del año. Además de esto, brinda distintos servicios entre los cuales se encuentran:

- Servicios Estándar:
 - Embarque y descarga de contenedores llenos o vacíos.
 - Transbordo de contenedores llenos o vacíos dentro del terminal.
- Servicios Especiales:
 - Re-estiba de contenedores.
 - Uso de área operativa de contenedores vacíos y de transbordo.
 - Uso de área operativa contenedores de importación y exportación.
 - Manipuleo de carga sobredimensionada.
 - Servicios a contenedores con carga peligrosa.
 - Energía, monitoreo y manipuleo de contenedores *reefer*.

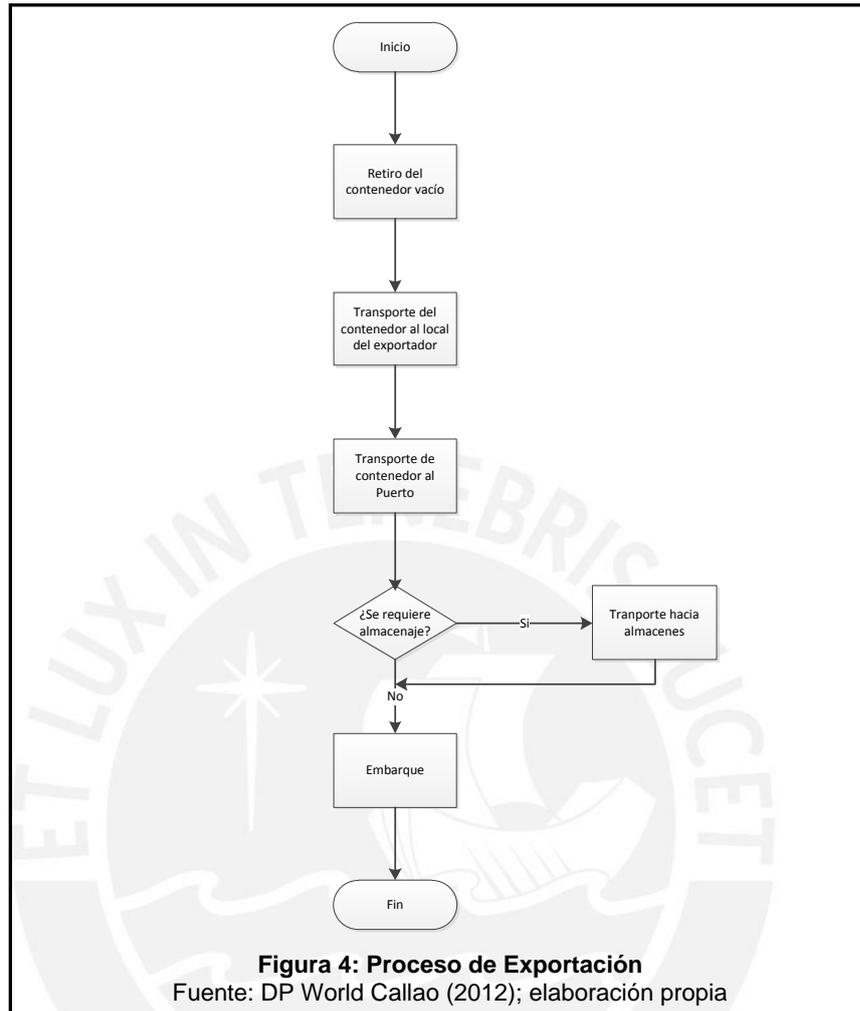
Los siguientes flujos presentados en la figura 3 y figura 4 describen el proceso de importación y de exportación respectivamente.

a) Flujo de importación



Fuente: DP World Callao (2012); elaboración propia

b) Flujo de exportación



Para poder brindar todos estos servicios el terminal se encuentra equipado de acuerdo a lo mostrado en la tabla 4

Tabla 4: Recursos Terminal Muelle XYZ

Especificaciones del Puerto		Equipos de Patio	Unidades
Muelle	650 metros	Grúas Post-Panamax	6
Calado	16 metros en el amarradero	Grúas de Patio (RTGs)	18
Patio de Contenedores	21.5 hectáreas con capacidad para almacenar	Chassis y Trailers	30
	850,000 TEUs anuales	Porta-Contenedores (Reach Stackers)	2
Capacidad para almacenar contenedores refrigerados	240 conectores + conectores móviles adicionales	Porta-Contenedores de Vacíos (Empty Handlers)	2

Fuente: DP World Callao (2012); elaboración propia

Además de estos recursos tiene asignados cierto número de carriles para cada tipo de operación en puerta; es decir la entrada de contenedores tiene un número fijo de carriles asignados (6) y la salida de estos tiene otra cantidad (4).

Actualmente la empresa presenta una propuesta de costos mucho menor para el transporte de contenedores la cual se puede ver en la tabla 5; si comparamos el servicio estándar antes mencionado contra el servicio de su principal competidor, el cual incluye: uso de muelle, derecho de embarque o descarga, gremios, manipuleo y transferencia y tracción se generan ahorros para los clientes de hasta 78%.

Tabla 5: Costo y Ahorro por servicio

Costo Básico a la Carga			Ahorros	
Importación/Exportación	Actual	La Empresa	USD	Porcentaje
20FT	289,00	65,00	224,00	78%
40FT	323,00	100,18	223,00	69%

Fuente: DP World Callao (2012); elaboración propia

Por otro lado la empresa se preocupa por el medio ambiente, es por eso que mantiene un monitoreo constante de su entorno el cual incluye: aguas y sedimentos, aguas residuales, calidad del aire, ruido y tratamiento de desperdicios. Además de esto cuenta con una certificación del Sistema de Gestión para la seguridad de la cadena de suministro ISO 28000:2007. Finalmente cuenta con un área de responsabilidad social la cual no sólo se preocupa del bienestar de sus trabajadores sino de la comunidad por lo que realiza campañas en conjunto para limpieza de playas y mejora en infraestructuras de la comunidad.

2.2. Descripción de la problemática

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo establece una tasa de ocupabilidad permisible de 65% en terminales como el Muelle XYZ; sin embargo, la ideal dentro de las operaciones del terminal portuario donde se encuentra es 70%. Este indicador se construye en base al cociente resultante entre el tiempo total de permanencia de las naves con el tiempo disponible del muelle. Cuando se tiene una tasa de ocupabilidad mayor a 70% se evidencia que los muelles presentan signos de saturación o congestión que conlleva a que las naves se encuentren en espera en bahía por sitio un sitio de atraque.

Durante el 2011 el TPC recibió un total de 3,085 naves de las cuales el 30.8% fueron recibidas por el Muelle XYZ, a continuación en la tabla 6 se detallan las naves recibidas por muelle.

Tabla 6: Naves recibidas en el TPC

Muelle	Naves Recibidas	Porcentaje
Muelle 1	233	7.6%
Muelle 2	310	10.0%
Muelle 3	292	9.5%
Muelle 4	220	7.1%
Muelle 5	653	21.2%
Muelle 7	212	6.9%
Muelle 11	216	7.0%
Muelle XYZ	949	30.8%
Total	3,085	100.0%

Fuente: APN (2012); elaboración propia

El Terminal Portuario Muelle XYZ para el 2011 presente una tasa de ocupabilidad de 79.2% lo cual supera el nivel ideal. Las tasas de ocupabilidad de los diferentes terminales en el TPC se detallan en la figura 5.

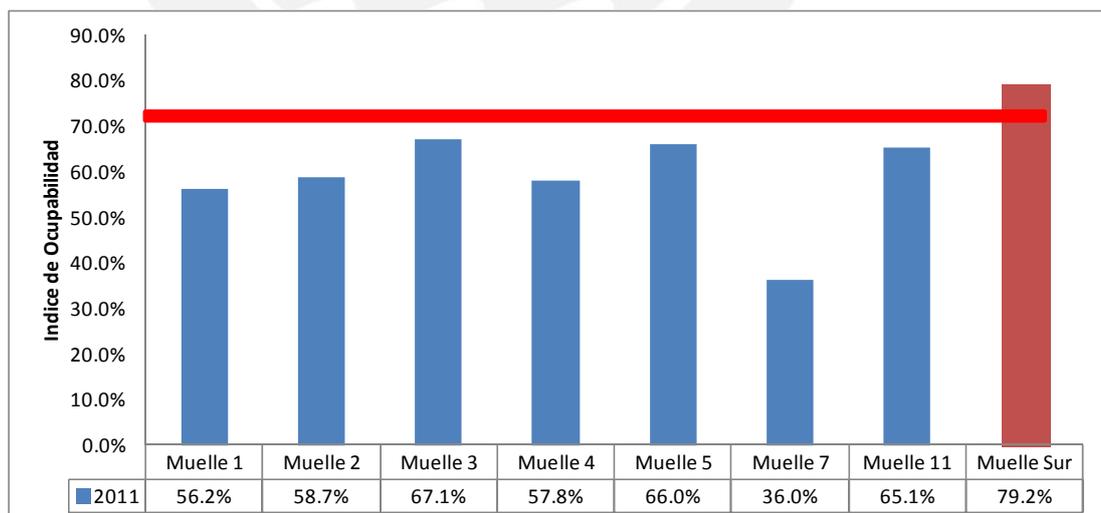


Figura 5: Tasa de Ocupabilidad vs Standard

Fuente: APN (2012); elaboración propia

2.3. Diagnóstico

2.3.1. Datos generales

Durante los seis primeros meses de operación el Terminal Muelle XYZ había asumido el 72% de la carga de contenedores que antes tenía su principal competidor lo cual aumentó significativamente la movilización de contenedores dentro del muelle. En la actualidad se presenta un gran incremento en la utilización de este muelle y con esto tenemos varios indicadores que servirán en el análisis de la problemática. Primero se detallará un comparativo con los demás muelles y empresas que concesionan los mismos.

En la figura 6 podemos apreciar una gran participación del Muelle XYZ en la atención de las naves que arriban al Puerto ABC.



Figura 6: Naves recibidas en los terminales portuarios

Fuente: APN (2012); elaboración propia

Además de contabilizar las naves atendidas también es importante medir tiempos de servicio en cada uno de los muelles, con lo que se puede reflejar un comparativo general respecto al tiempo de permanencia media de las naves en los terminales portuarios lo cual se muestra en la figura 7.

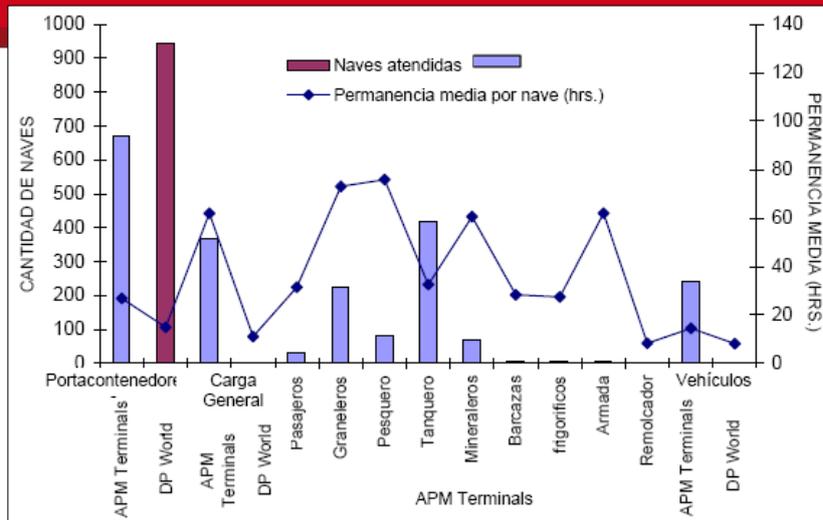


Figura 7: Tiempo de estadía de las naves en los terminales portuarios
Fuente: APN (2012)

Se puede apreciar una notable diferencia en el tiempo promedio de estadía de las naves en el Terminal XYZ (15 hrs.) contra el tiempo medio de los demás terminales (22 hrs.).

2.3.2. Estadísticas de la empresa

La tabla 7 resume para el año 2011 información mensual de tiempo promedio de estadía en el muelle y TEUS totales movilizados; se define TEUS como la unidad de medida para capacidad de transporte marítimo en contenedores (*Twenty-foot Equivalent Unit*),

Tabla 7: Tiempo de estadía – TEUS movilizados

Mes	Tiempo de estadía de la nave en muelle	TEUS
Ene-11	15:26	79,863
Feb-11	17:17	82,839
Mar-11	16:43	88,828
Abr-11	15:11	89,835
May-11	15:16	101,005
Jun-11	15:57	94,505
Jul-11	13:35	95,685
Ago-11	14:20	102,826
Set-11	13:19	96,341
Oct-11	13:48	100,950
Nov-11	13:45	93,924
Dic-11	14:38	113,238

Fuente: APN (2012); elaboración propia

Se apreciará mejor el aumento sostenible en la movilización de TEUS por parte del terminal sur en la figura 8.

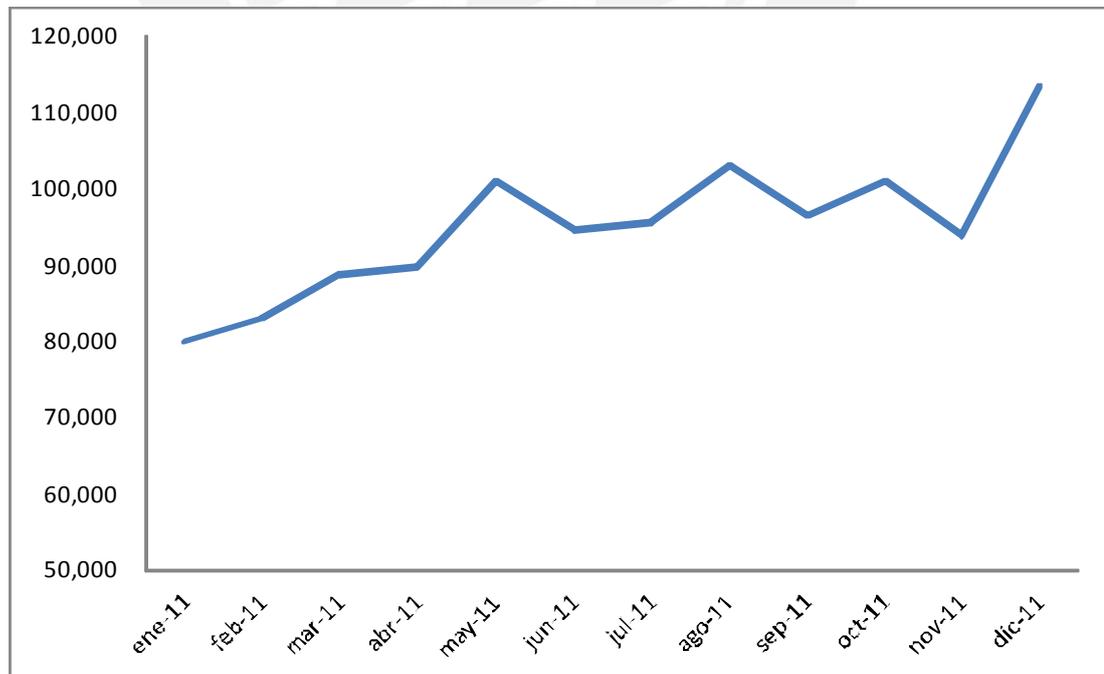


Figura 8: Total de TEUS movilizados
Fuente: APN (2012), elaboración propia

Es importante señalar que el incremento promedio mensual es de 4% y que se mantiene constante desde que comenzó a operar, lo que supone el mismo aumento en las operaciones para los próximos años.

Además para complementar el diagnóstico se hizo un análisis por naves llegando los siguientes resultados representados en la figura 9.

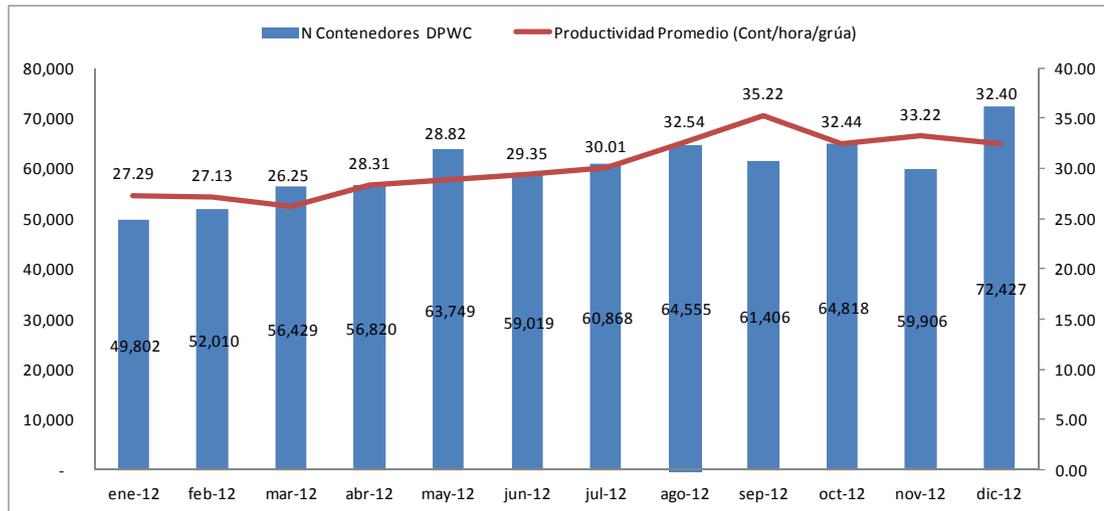


Figura 9: Movimiento promedio por nave
Fuente: La empresa (2012); elaboración propia

Se observa un promedio de contenedores por nave de 60,000 unidades y una productividad promedio de 32 contenedores por hora por grúa.

Por último se registraron tiempos de manipuleo fuera de operaciones (inicio de descarga y zarpe), en la figura 10 se resume la información para el 2011.

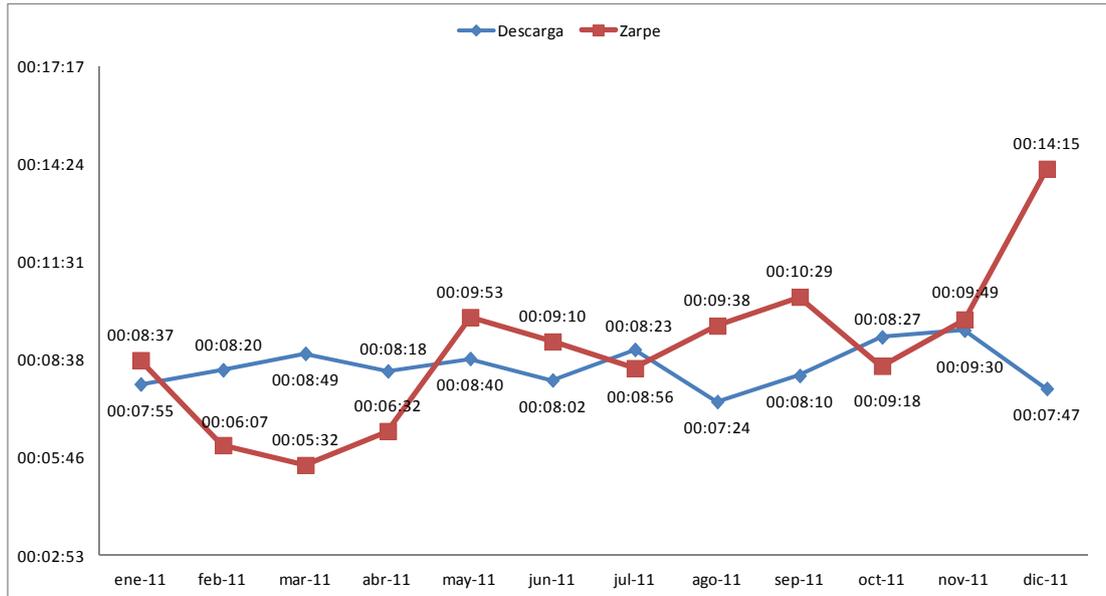


Figura 10: Tiempo promedio para el inicio de la descarga y el zarpe
Fuente: La empresa (2011)

Como se aprecia en la figura 10 los tiempos de manipuleo son relativamente cortos y en promedio son 8:54 minutos para el inicio de la descarga y 8:26 minutos para el zarpe, siendo menos del 1% del tiempo promedio de estadía de la nave en el terminal.

Con toda la información detallada líneas arriba en conjunto con la problemática antes expuesta se procederá al desarrollo de un modelo el cual permita encontrar una solución que optimice la tasa de ocupabilidad dentro de Terminal Muelle XYZ.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO

3.1. Supuestos para establecer el modelo

- Se planteará un modelo bajo la condición de sistema no terminal. La razón es que el muelle atiende las 24 horas del día de forma continua sin interrupciones programadas.
- En ningún escenario los buques esperan en algún amarradero la llegada de contenedores que no se encuentren ya en el patio de maniobras.
- Para efectos de la simulación se crean entidades ficticias las cuales permitirán determinar cuando la carga y descarga de contenedores en un determinado buque hayan terminado para que puedan seguir el flujo del proceso.

3.2. Componentes del modelo

3.2.1. Entidades

Las entidades dinámicas del sistema serán los contenedores que arriban a los amarraderos. Estos contenedores tienen dos formas diferentes de arribo, la primera es cuando arriban en un buque porta contenedores para ser descargados; la otra es cuando llegan desde los almacenes de los exportadores para ser cargadas en los buques.

El modelo de simulación considera un tipo de entidad más la cual representa al buque que llega inicialmente con los contenedores a descargar y el cual se llevará consigo los contenedores a cargar. La tabla 8 muestra la cantidad promedio mensual de buques porta contenedores que arriban al muelle, además se muestra la cantidad de promedio de contenedores para carga y descarga que son operados de forma mensual en el terminal.

Tabla 8: Promedio Mensual de buques y tipo de operación

Entidad	Promedio Mensual
Buques	79
Carga	22,483
Descarga	33,938

Fuente: APN (2012); elaboración propia

3.2.2. Atributos

Dentro del modelo de simulación existen distintos atributos los cuales permiten dar una característica específica a una entidad con lo cual se determina el flujo que siga esta a lo largo de todo el proceso de simulación.

En la tabla 9 se muestran los atributos dentro del modelo y la función que cumplen dentro del proceso de simulación.

Tabla 9: Atributos del Sistema

Atributo	Función
Amarradero_destino	Asigna el amarradero al cual se dirigirá el buque porta contenedores para el proceso de descarga, así como el amarradero en el cual se encuentra atracado el buque en donde serán cargados los contenedores que se encuentran en el patio de maniobras.
Tipo_operación	Asigna el tipo de operación que se va realizar con un contenedor; es decir indica si seguirá un proceso de carga o descarga.
Tipo_buque	Indica si la nave es tipo Gear o Gearless
Cantidad_gruas	Funciona en conjunto con la variable Asignacion_gruas con lo cual se determina la cantidad de grúas a asignar a un buque atracado en un amarradero.
Tipo_contenedor	Indica si se trata de un contenedor de veinte o cuarenta pies.
Numbuque	Asigna un número a cada buque el cual también se le asignará a todos los contenedores que seguirán un proceso dentro de él, independientemente si es de carga o descarga.

Elaboración propia

3.2.3. Recursos

Durante los procesos de carga y descarga es necesario contar con recursos que permitan realizar las operaciones tanto en los amarraderos como en el área de almacenaje o patio de maniobras. A continuación se presentan los recursos del sistema y cuál es la función de cada uno de ellos.

Tabla 10: Recursos Comunes

Recurso	Cantidad	Uso
R_patio1, R_patio2, R_patio3, R_patio4	85,0000	Espacio en donde se colocan los contenedores al ser descargados o antes de ser cargados.
RTG1,...,RTG18	18	Grúas de patio encargadas de movilizar a los contenedores dentro del patio de maniobras.
R_Grua_PostPanamax	6	Encargadas de cargar o descargar los contenedores en o desde los buques.
R_amarradero1 , R_amarradero2	2	Lugar físico, en el muelle, en donde atracan los buques porta contenedores para realizar las operaciones.

Elaboración propia

3.2.4. Colas

El modelo cuenta con diferentes tipos de cola las cuales representan la espera de las entidades antes de realizar algún proceso. Todas estas colas son del tipo primera en entrar, primera en salir (FIFO); es decir, aquella entidad que llegue primero a cierta cola tendrá la prioridad más alta en salir de esta.

A continuación, en la tabla 11, se muestran los tipos de cola y cuantas de cada tipo existen las cuales llevan numeración sucesiva dentro del modelo.

Tabla 11: Descripción de Colas

Cola	Cantidad	Descripción
Cola_tran_cX	4	Espera de los contenedores que llegan al patio de maniobras para ser transportados al amarradero en donde se encuentra su buque de destino.
Cola_RTG_patioX	4	Espera de los contenedores en patio para ser movilizados por alguna grúa de patio dentro del mismo.
Cola_patio_maniobras	1	Espera de los contenedores para que se les asigne un lugar dentro del patio de maniobras.
Cola_transporteX	2	Espera de los contenedores descargados de un buque para ser llevados al patio de maniobras.
Cola_amarreX	2	Espera de los buques porta contenedores para amarrar dentro del terminal.

Elaboración propia

3.2.5. Estaciones

Las estaciones en el modelo representan en lugar físico en donde se realiza algún servicio u operación. Además existe una estación ficticia en la cual se hacen agrupaciones de entidades para que el proceso de simulación se acerque más a la realidad. En la tabla 12 se detallan las estaciones del modelo.

Tabla 12: Estaciones

Estaciones	Descripción
E_agrupe	Estación ficticia en donde se agrupan entidades duplicadas luego de terminar su espera en patio.
E_Llegada_Contenedores	Representa el lugar de llegada de contenedores para carga.
E_AmarraderoX	Representa la estación en donde atraca el porta contenedor.
E_descarga_aX	Lugar en donde se produce el proceso de descarga de contenedores.
E_carga_amarraderoX	Lugar en donde se produce el proceso de carga de contenedores.
E_zarpeX	Estación en donde se realiza el desatraque del porta contenedores.
E_patio_de_maniobras	Estación en donde se almacenan los contenedores que son descargados o esperan para ser cargados.
E_llegada_Buques	Lugar en donde llegan los buques y esperan que se les asigne un amarradero para atracar.

Elaboración propia

3.2.6. Variables

En la tabla 13 se presentan las variables empleadas en el modelo y que representan las mismas.

Tabla 13: Variables

Variable	Función
cargatotalLISTA	Esta variable está concatenada con el número de buque y con el tipo de contenedor, guarda la información de cuanta carga por tipo de contenedor ya se encuentra lista para ser cargada en un buque
Cargatotal	Indica la carga total que debe ser cargada a un determinado buque diferenciando cada tipo de contenedor.
Descargabuque	Indica la cantidad de contenedores que se deben descargar de un buque.
Descargabuque_listo	Va guardando los valores de los contenedores que ya fueron descargados y están listos para seguir con el proceso.
Cargabuque	Indica la cantidad de contenedores a ser cargados en un buque.
Cargabuque_listo	Guarda la información sucesivamente de todos los contenedores que ya terminaron el proceso previo a la carga y están listos para ser cargados.
Asignacion_gruas	Indica el número de grúas Post Panamax a ser asignadas a cada buque en un amarradero.

Elaboración propia

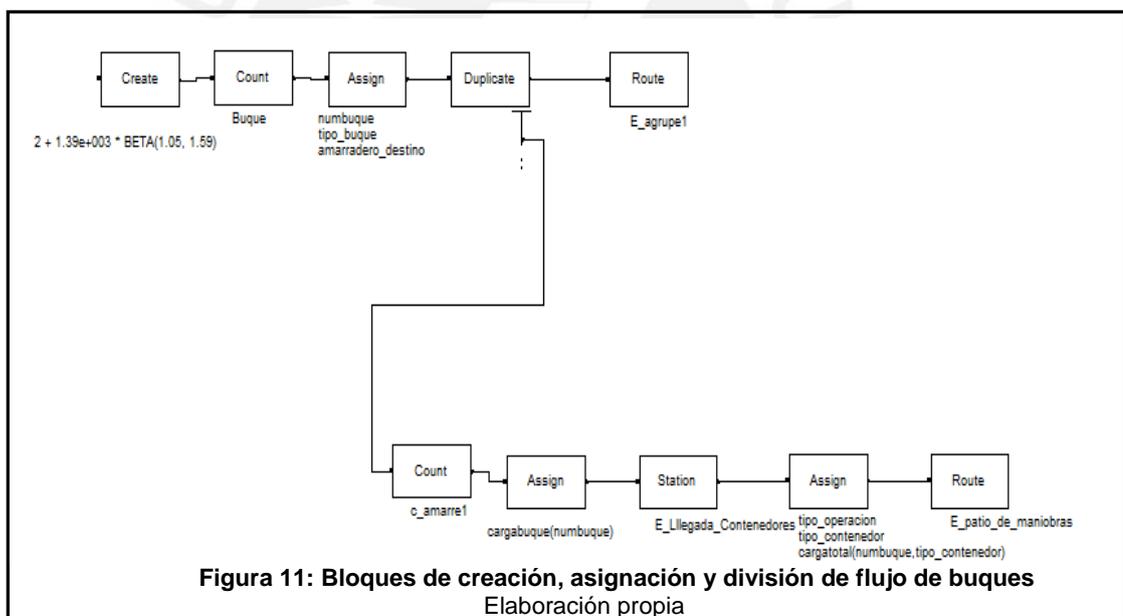
3.3. Diseño del modelo

3.3.1. Simulación de la llegada de los buques portacontenedores

Para simular la llegada de los buques se emplea un bloque *create* donde se ingresa la tasa de llegada (los datos de la cantidad de arribos por mes son obtenidos mediante reportes solicitados a la Autoridad Portuaria Nacional). Luego mediante

un bloque *count* se cuenta la cantidad de buques van llegando para después con un bloque *assign* poder asignarle el número de buque que acaba de llegar, el tipo de buque (Gear o Gearless) y el amarradero en el cual debe atracar. Finalizado esto con la ayuda de un *duplicate* se duplica la entidad original con una distribución que dará como resultado la cantidad de contenedores que se van a cargar en este buque; la entidad original seguirá un *route* la cual la transportara a una estación ficticia llamada *E_agrupe1* en donde esperará que los contenedores ya estén listos para ser cargados luego de haber terminado su periodo de almacenaje.

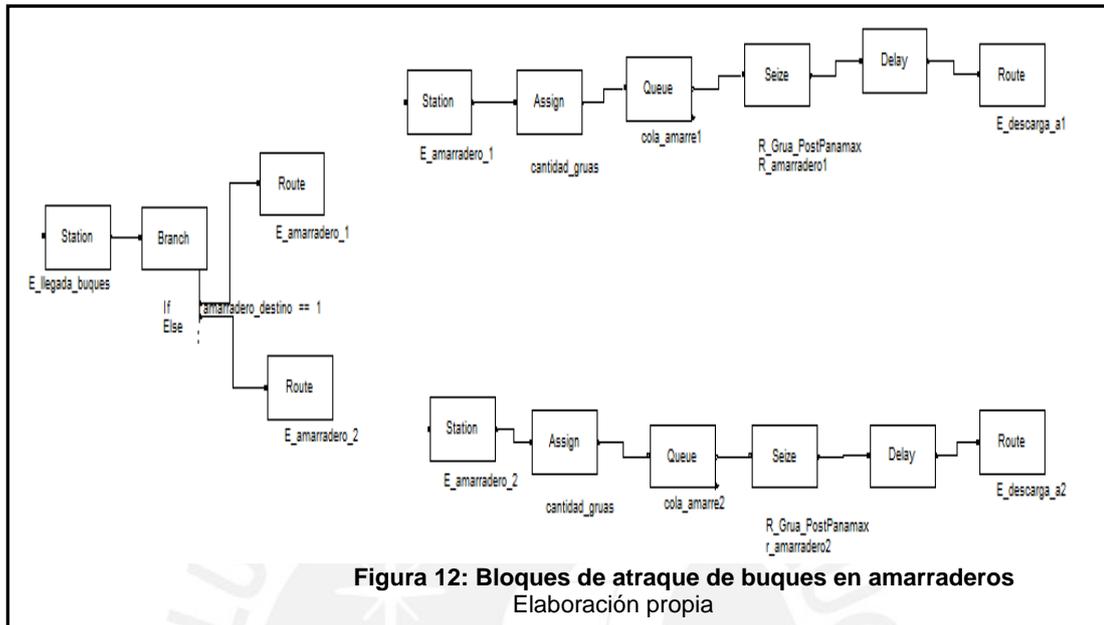
Por otro lado a las entidades duplicadas se les asignará la variable *cargabuque* en función al atributo *numbuque* que permitirá saber cuántos contenedores serán cargados a cada buque, luego de esto llegaran a la estación *E_Llegada_Contenedores* para por medio de un *assign* recibir tres atributos: *tipo_operación*, *tipo_contenedor*, *cargatotal(numbuque, tipo_contenedor)*. Finalmente seguirán al *route* para ser transportadas al patio de maniobras. Este proceso se observa en la figura 11



3.3.2. Simulación del proceso de amarre de los buques porta contenedores

Luego de llegar a la estación *E_Llegada* de buques los porta contenedores pasarán por un block *branch* en donde se dividirán por el destino de amarre que tienen ya sea el amarradero1 o el amarradero2, después pasaran por un *route* que los transportará al amarradero correspondiente. Ya en el amarradero que les corresponda mediante un bloque *assign* se les asignará la cantidad de grúas a emplear, seguirán hacia un bloque *queue* que representa la espera antes de pasar por el bloque *seize* el cual asignará la cantidad de grúas y el amarradero

correspondiente. Finalmente seguirán hacia un bloque *delay* el cual representa la demora de atraque por cada buque para seguir su camino hacia la siguiente estación. En la figura 12 se muestra el proceso descrito en líneas anteriores.



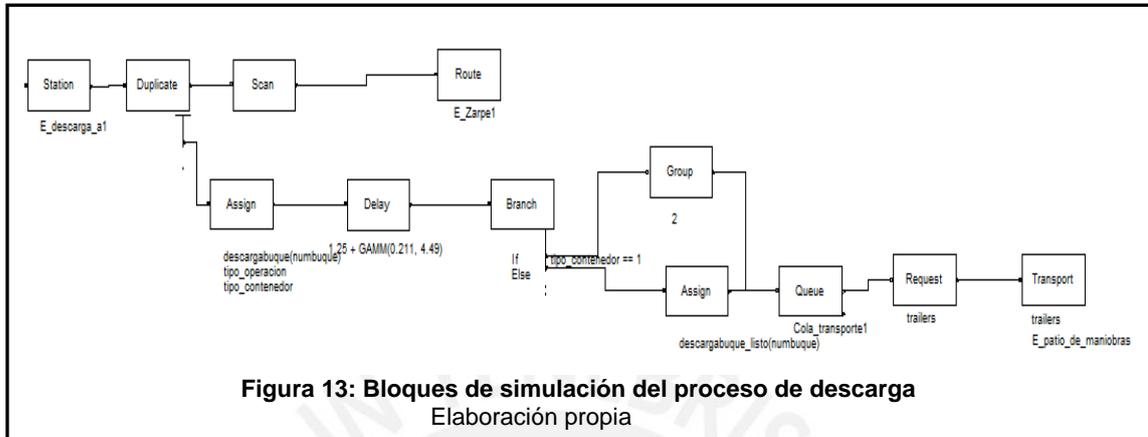
3.3.3. Simulación del proceso de descarga de contenedores

Para simular el proceso de descarga de contenedor se utiliza el bloque *duplicate* el cual duplicará la entidad original que representa al buque tantas veces como contenedores llegan en este para ser descargados de acuerdo a las distribuciones correspondientes. Luego de esto el proceso se ramifica en dos bloques; la entidad original llega al bloque *scan* en donde esperará que el proceso de descarga haya terminado para por medio de un *route* ser trasladada a la estación de zarpe correspondiente.

Por otro lado las entidades duplicadas, que representan los contenedores a descargar, pasan por el bloque *assign*, el cual les asignará distintos atributos. El primero es una variable conectada con un atributo *descargabuque(numbuque)* las cual permitirá saber cuántos contenedores del proceso de descarga por cada buque que llegan. Terminado esto pasa por un *delay* que representa el tiempo que demoran las grúas en descargar un contenedor, seguidamente llegarán a un *branch* el cual las dividirá según el tipo de contenedor que sea; los contenedores del tipo 1 (*20feet*) serán agrupados de dos en dos mediante el bloque *group* para poder ser transportadas por los trailers, luego se unirán con las que no pertenezcan al tipo1 para entrar a un *queue* llamado *cola_transporte* el cual representa la espera de los contenedoras hasta que llegue un tráiler a recogerlos, para esto pasan por un

bloque *request* que envía el requerimiento de uno y finalmente por un *transport* que los lleva a la estación siguiente.

Este proceso se repite de la misma manera para ambos amarraderos y se puede observar en la figura 13.



3.3.4. Simulación del proceso de carga de contenedores

El proceso de carga de contenedores se realiza de la siguiente forma: luego de haber estado un determinado tiempo almacenados en el patio de maniobras y cuando el buque al cual deben ser cargados ya se encuentra en el amarradero correspondiente los contenedores llegan a la estación *E_carga_Amarradero* para luego pasar por el bloque *free* el cual libera al tráiler ocupado, luego las entidades llegan a un *branch* donde se separan según el tipo de contenedor que sean; si son del tipo 1 llegarán al bloque *split* el cual separa el grupo antes formado en dos entidades independientes. Terminado esto ambas ramas vuelven a unirse en un bloque *delay* el cual representará la demora de las grúas para cargar contenedor por contenedor dentro de los buques, acto seguido llegarán a un *group* el cual está condicionado al atributo *numbuque* con lo cual solo se agruparán contenedores que llegaron para ser cargados en el mismo buque, además la cantidad a agrupar es igual al número de entidades duplicadas las cuales representan los contenedores a cargar.

Finalmente mediante un *route* son transportadas a la siguiente estación. Todo este sub proceso se presenta en la figura 14.

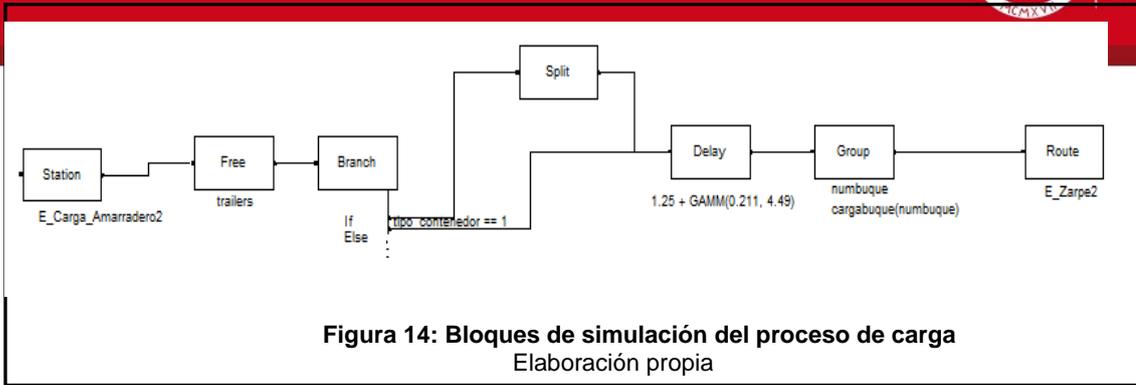


Figura 14: Bloques de simulación del proceso de carga
Elaboración propia

3.3.5. Simulación del proceso de zarpe de los buques portacontenedores

El proceso de zarpe, el cual se presenta en la figura 15, empieza cuando se han terminado los procesos de carga y descarga el buque está listo para zarpar y abandonar el amarradero en el cual se encuentra atracado.

Dentro de la estación *E_Zarpe* las entidades pasan por un *group* en donde se agrupan de acuerdo al atributo *numbuque* este agrupamiento es para juntar todas los grupos previos formados para que vuelvan a integrar solo un buque que se irá del sistema. Luego pasaran por un *delay* el cual representa el tiempo que se demora un buque en desamarrar y salir del amarradero; se desasignan las grúas y el amarradero asignado mediante un *release* y finalmente las entidades salen del sistema con un *dispose*.

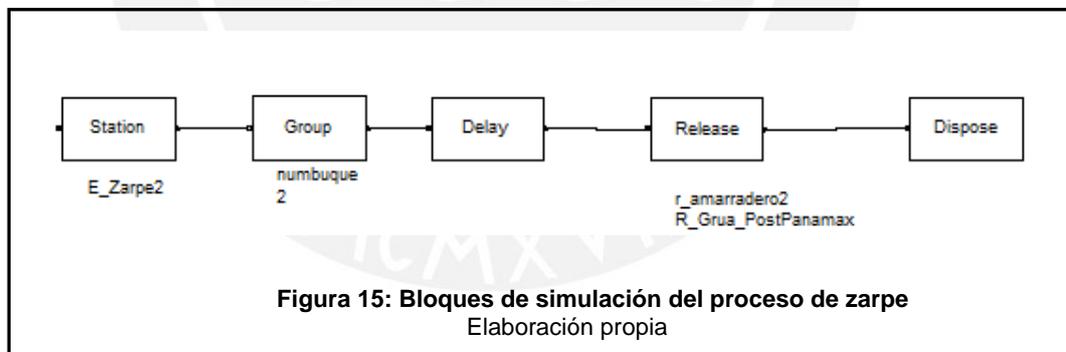


Figura 15: Bloques de simulación del proceso de zarpe
Elaboración propia

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE DATOS

4.1. Análisis de varianza entre los datos

Para determinar si la variabilidad entre dos grupos de muestras afectados por un factor es relevante y por lo tanto se deben de considerar distribuciones estadísticas diferentes para cada caso se utilizó el método de análisis de varianza ANOVA.

A continuación se muestra el análisis completo para los casos que se consideraron relevantes en el estudio por factores.

a) Tiempo de ataque según tipo de nave

Se tomaron muestras de los tiempos de ataque diferenciando el tipo de nave, llegando a los siguientes resultados resumidos en la tabla 14:

Tabla 14: Resultados prueba ANOVA, ataque de naves

Resumen				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Ataque Gear	275	4962	18.043	191.545
Ataque Gearless	267	4853	18.176	71.092

Análisis de Varianza						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	2.374	1	2.374	0.017	0.893	3.858
Dentro de los grupos	71394.202	540	132.211			
Total	71396.577	541				

Elaboración propia

Se observa que el valor calculado en la prueba del estadístico F es menor al de tablas ($0.017 < 3.858$) con lo que se puede concluir que la variabilidad entre estos dos grupos de datos es insignificante, por lo tanto no es necesario calcular distribuciones diferenciadas por tipo de nave para el proceso de ataque.

b) Tiempo de zarpe según tipo de nave

De igual manera que en el caso anterior se tomaron muestras de los tiempos de zarpe diferenciando el tipo de nave, llegando a los siguientes resultados resumidos en la tabla 15:

Tabla 15: Resultados prueba ANOVA, zarpe de naves

Resumen				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Zarpe Gear	275	2387	8.680	29.466
Zarpe Gearless	278	2355	8.471	25.751

Análisis de Varianza						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	6.025	1	6.025	0.218	0.640	3.858
Dentro de los grupos	15207.109	551	27.599			
Total	15213.135	552				

Elaboración propia

Se observa que el valor calculado en la prueba del estadístico F es menor al de tablas ($0.218 < 3.858$) con lo que se puede concluir que la variabilidad entre estos dos grupos de datos es insignificante, por lo tanto no es necesario calcular distribuciones diferenciadas por tipo de nave para el proceso de zarpe.

4.2. Determinación de las distribuciones estadísticas

Para determinar las distribuciones estadísticas que siguen todas las operaciones y tiempos en el sistema se utilizó la herramienta Input Analyzer del programa Arena. A continuación se muestra el análisis completo para uno de los procesos, el tiempo entre llegadas de embarcaciones.

En todos los procesos y tiempos se parte de una prueba piloto de 30 datos sobre el total de datos recolectados para poder terminar el tamaño de muestra que será necesario ingresar al Input Analyzer. Dada esta muestra se procede al cálculo del tamaño de muestra usando la siguiente fórmula:

$$n = \frac{\frac{(Z_{1-\alpha/2})^2 \times \sigma^2}{\bar{X} \times e}}{1 + \frac{\frac{(Z_{1-\alpha/2})^2 \times \sigma^2}{\bar{X} \times e}}{n_p}}$$

Donde,

α , es el nivel de significancia deseado en la muestra (en todos los casos se usará 0.05)

σ , es la desviación estándar de la muestra piloto

\bar{X} , es el promedio de la muestra piloto

e , es el error máximo deseado de la muestra (en todos los casos se usará 0.05)

n_p , es el tamaño de la muestra piloto

Para este ejemplo en particular el tamaño de muestra es de 264 datos, los cuales se extraen de manera aleatoria de los datos totales y se ingresan al Input Analyzer del cual se obtiene la figura 16:

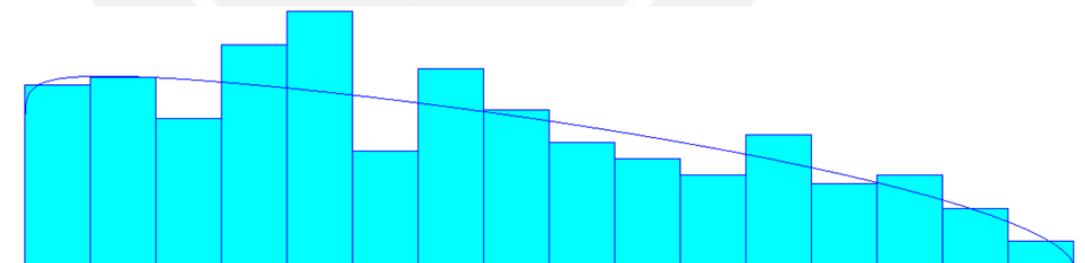


Figura 16: Distribución de los tiempos entre llegadas de las embarcaciones
Fuente: Input Analyzer, Elaboración propia

En el reporte aparece un resumen de los datos (*Data Summary*) que conforman la distribución estadística. Estos son: número de datos, el menor y mayor valor, el promedio y la desviación estándar. También se indica en que rango se está construyendo y cuántos son los intervalos que conforman el histograma de datos, como se puede apreciar en la tabla 16:

Tabla 16: Resultados *Data Summary*, distribución de los tiempos entre llegadas de las embarcaciones

Data Summary	
Número de puntos de datos	264
Valor mínimo	2
Valor máximo	1400
Media muestral	556
Desviación estándar muestral	357

Histogram Summary	
Rango del histograma	2 to 1400
Número de intervalos	16

Fuente: Input Analyzer; elaboración propia

El reporte proporciona los resultados de las pruebas Chi cuadrado y Kolmogorov Smirnov, indicando en cada caso el valor de *p-value* que se compara con el nivel de significancia. Al poseer un tamaño de muestra de 264 datos y al ser estos datos continuos utilizamos la prueba Kolmogorov Smirnov para verificar la validez de la distribución seleccionada. En el ejemplo el valor de *p-value* > 0.15 es mayor que α , por lo tanto la distribución seleccionada es correcta. En la tabla 17 se muestran los resultados de dichas pruebas:

Tabla 17: Resultados pruebas Chi cuadrado y Kolmogorov Smirnov, distribución de los tiempos entre llegadas de las embarcaciones

Chi Square Test	
Número de intervalos	14
Grados de libertad	11
Estadístico de la prueba	12.6
<i>p-value</i>	0.335

Kolmogorov Smirnov Test	
Estadístico de la prueba	0.0553
<i>p-value</i>	> 0.15

Fuente: Input Analyzer; elaboración propia

Además el Input Analyzer permite obtener la mejor distribución de probabilidad que se ajuste a los datos. En el ejemplo tenemos que para el tiempo entre llegadas de embarcaciones la distribución elegida es una Beta con un error al cuadrado de 0.003, como se puede apreciar en la tabla 18:

Tabla 18: Elección mejor distribución de probabilidad, distribución de los tiempos entre llegadas de las embarcaciones

Distribución	Error al cuadrado
Beta	0.003
Weibull	0.005
Gamma	0.006

Distribución Summary	
Distribución	Beta
Expresión	$2 + 1.39e+003 * BETA(1.05, 1.59)$
Error cuadrático	0.003

Fuente: Input Analyzer; elaboración propia

El procedimiento descrito se repite para cada variable aleatoria y los resultados de resumen en las tablas 19, 20 y 21.

Ver Anexo 1.

Tabla 19: Distribución estadística de los tiempos (minutos) entre llegadas de las embarcaciones

Operación	Distribución	p-value
Tiempo entre llegadas de embarcaciones	$2 + 1.39e+003 * BETA(1.05, 1.59)$	> 0.15

Fuente: Input Analyzer; elaboración propia

Tabla 20: Distribuciones estadísticas de la cantidad de contenedores por embarcación

Operación	Distribución	p-value
Distribución de contenedores a descargar por embarcación tipo "Gear"	Empírica	No aplica
Distribución de contenedores a descargar por embarcación tipo "Gearless"	$4 + 1.35e+003 *$ BETA(0.977, 1.63)	0.08
Distribución de contenedores a cargar por embarcación tipo "Gear"	$-0.001 + 1050 *$ BETA(1.62, 5.79)	> 0.15
Distribución de contenedores a cargar por embarcación tipo "Gearless"	$2 +$ GAMM(277, 1.31)	0.122

Fuente: Input Analyzer; elaboración propia

Tabla 21: Distribuciones estadísticas de los tiempos (minutos) de todas las operaciones del muelle

Operación	Distribución	p-value
Amarre embarcaciones tipo "Gear" y "Gearless"	Empírica	No aplica
Zarpe embarcaciones tipo "Gear" y "Gearless"	Empírica	No aplica
Tiempo de operación por contenedor (carga y descarga)	$1.25 +$ GAMM(0.211, 4.49)	> 0.15

Fuente: Input Analyzer; elaboración propia

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

5.1. Análisis de resultados

5.1.1. Análisis de resultados de los principales indicadores

Antes de proceder con la validación de resultados del modelo es necesario analizar si los resultados obtenidos son coherentes con respecto al sistema real.

A continuación se presentan los resultados que arroja el modelo:

- a) En la tabla 22 se muestra el tiempo promedio que demora una nave desde que atracca en la primera línea del muelle hasta que desatraca la última línea, lo que se puede entender como el tiempo total de estadía de la nave en el muelle.

Tabla 22: Resultados de los tiempos (minutos) de estadía de naves por amarradero

Amarradero	Promedio
Amarradero 1	818.31
Amarradero 2	796.86

Elaboración propia

Como se ve en la tabla 22 en promedio el tiempo que demora una nave en ser atendida en el Amarradero 1 es 818.31 minutos y en el Amarradero 2 es 796.86 minutos, equivalente a 13:38 y 13:17 horas respectivamente lo que se ajusta a la realidad dado que en la data histórica se pudo calcular que en promedio demora 13:42 y 13:22 horas para cada amarradero respectivamente.

- b) En la tabla 23 se presentan la cantidad de naves atendidas y el número de contenedores movilizados, así como también el detalle de contenedores cargados y descargados por amarradero.

Tabla 23: Resultados de número de naves atendidas y contenedores movilizados

Categoría	Promedio
Naves atendidas	587
Contenedores movilizados	435,698
Cargados en amarradero 1	88,634
Cargados en amarradero 2	81,501
Descargados en amarradero 1	149,924
Descargados en amarradero 2	133,639

Elaboración propia

En la tabla 23 se aprecia que el total de naves atendidas es de 587 unidades y el total de es 435,698 unidades, con lo cual también se puede concluir que los datos que arroja el sistema son coherentes dado que los datos recopilados muestran que se atienden 572 naves y se movilizan 413,295 contenedores.

- c) En la tabla 24 se presentan los resultados de utilizaciones de las grúas de patio utilizadas en el sistema.

Tabla 24: Resultados de las utilizaciones de las grúas RTG

Grúas	Promedio
Grúa RTG 1	80.69%
Grúa RTG 2	80.48%
Grúa RTG 3	80.25%
Grúa RTG 4	79.97%
Grúa RTG 5	79.80%
Grúa RTG 6	56.82%
Grúa RTG 7	55.51%
Grúa RTG 8	53.71%
Grúa RTG 9	51.65%
Grúa RTG 10	49.58%
Grúa RTG 11	81.89%
Grúa RTG 12	81.66%
Grúa RTG 13	81.44%
Grúa RTG 14	81.13%
Grúa RTG 15	81.61%
Grúa RTG 16	81.37%
Grúa RTG 17	81.09%
Grúa RTG 18	80.80%

Elaboración propia

En la tabla 24, quitando los dos picos más bajos y más altos se aprecia que la utilización promedio de las grúas RTG es 75.33% lo que lleva a pensar que es uno de los recursos críticos del sistema y que probablemente la implementación de estas unidades sea parte de las propuestas de mejora del sistema.

5.1.2. Cálculo de la longitud de réplica adecuada

Antes de proceder con la validación de los resultados es necesario calcular la longitud de replica optima para poder validar los resultados con un nivel de significancia adecuado.

A continuación se presenta el procedimiento para el cálculo de longitud de replica:

a) Amarradero 1

Primero se grafica la evolución del promedio del tiempo de atención de las naves en el Amarradero 1. Al hacer esto se puede observar que hay un periodo de calentamiento de 500,000 minutos, los cuales fueron descartados. Este tiempo de calentamiento se debe a que al inicio de la simulación todas las unidades están disponibles, entonces para las primeras naves siempre se asignan rápidamente los recursos lo que implica un sesgo en la medición del tiempo de respuesta del sistema.

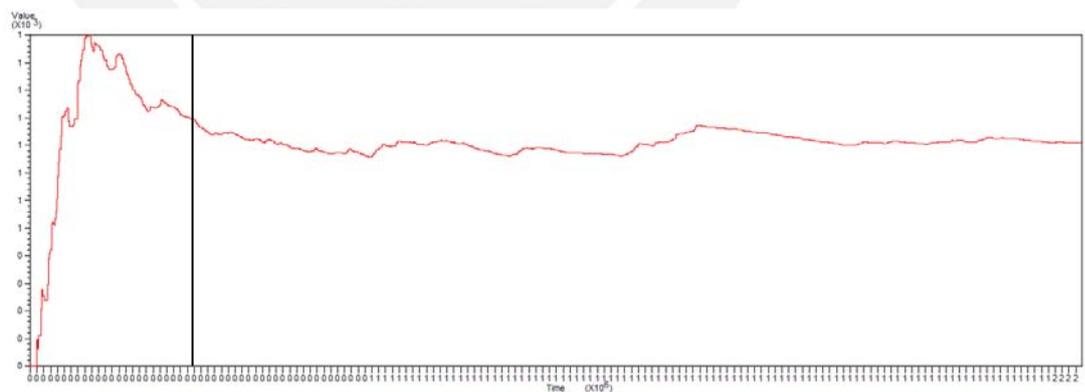


Figura 17: Evolución del tiempo de atención de las naves en el Amarradero 1

Fuente: Ouput Analyzer

Como todos los datos están correlacionados se debe de realizar un procedimiento de tal manera que se pueda obtener datos independientes para construir un intervalo de confianza.

Luego de determinar el tiempo de calentamiento este se separó de la corrida total realizando un proceso de truncamiento por *batches* en el cual se agrupa la data por tiempos de 5,000 minutos, como se muestra en la tabla 25:

Tabla 25: Resultados del primer agrupamiento del Amarradero 1

Concepto	Valor
Tiempo de truncamiento inicial	500,000
Número de <i>batches</i>	200
Tiempo entre <i>batches</i>	5000
Tiempo de truncamiento final	0
Covarianza estimada entre <i>batches</i>	0.99

Fuente: Ouput Analyzer; elaboración propia

Con esto se procedió a realizar un correlograma para determinar el número de observaciones que cada *batch* debe contener de tal manera que la correlación entre *batches* menor a 0.12.

Luego de realizar el correlograma se obtuvo que el número observaciones por *batch* era de 26 (A_1).

Con estos resultados se procedió a realizar un nuevo agrupamiento por observaciones, las cuales fueron determinadas en el paso anterior, como se muestra en la tabla 26:

Tabla 26: Resultados del segundo agrupamiento del Amarradero 1

Concepto	Valor
Tiempo de truncamiento inicial	0
Número de <i>batches</i>	44
Número de observaciones por <i>batch</i>	26
Número de observaciones truncadas al final	13
Covarianza estimada entre <i>batches</i>	0.649
Covarianza igual a cero rechazada a favor a covarianza > 0 al nivel 0,05	

Fuente: Ouput Analyzer; elaboración propia

Luego se procedió a realizar un análisis de intervalos de confianza con un nivel de confianza de 95% con el fin de determinar si la confiabilidad es la adecuada. Del análisis se obtienen los siguientes resultados:

Half Width: 34.1
Número de Observaciones: 44 (A_2)

Se emplea la siguiente fórmula para calcular el número de observaciones requeridas de acuerdo a un nuevo *half width*:

$$n^* = n \left(\frac{h}{h^*} \right)^2$$

Donde,

n^* , es el número de observaciones necesarias.

n , es el número de observaciones o *batches* (A_2)

h , es el *half width* resultante

h^* , es el *half width* deseado

Reemplazando los datos:

$$n^* = 44 \left(\frac{34.1}{52} \right)^2 = 19$$

Como resultado se tiene que para un nuevo *half width* de 52 minutos se necesitan 19 observaciones.

Finalmente se procede a hacer el cálculo de la longitud de réplica (LR), para lo cual se usa la siguiente fórmula:

$$LR = \text{periodo de calentamiento} + n^* * A_1 * A_2$$

Reemplazando los datos:

$$LR = 500,000 + 19 * 5,000 * 44 = 4,680,000 \text{ minutos}$$

Como resultado de todo este procedimiento se tiene que la longitud de réplica adecuada para la validación de resultados del Amarradero 1 es de 4,680,000 minutos.

b) Amarradero 2

Se repite el mismo procedimiento que en el Amarradero 1.

Primero se grafica la evolución del promedio del tiempo de atención de las naves en el Amarradero 2. Al hacer esto se puede observar que hay un periodo de calentamiento de 500,000 minutos, los cuales fueron descartados. Este tiempo de calentamiento se debe a que al inicio de la simulación todas las unidades están disponibles, entonces para las primeras naves siempre se asignan rápidamente los recursos lo que implica un sesgo en la medición del tiempo de respuesta del sistema.

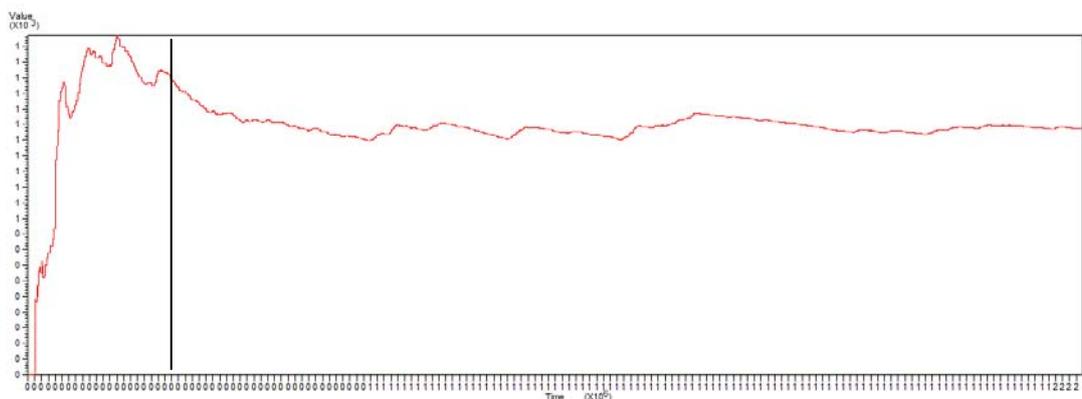


Figura 18: Evolución del tiempo de atención de las naves en el Amarradero 2
Fuente: Ouput Analyzer

Como todos los datos están correlacionados se debe de realizar un procedimiento de tal manera que se pueda obtener datos independientes para construir un intervalo de confianza.

Luego de determinar el tiempo de calentamiento este se separó de la corrida total realizando un proceso de truncamiento por *batches* en el cual se agrupa la data por tiempos de 5,000 minutos, como se muestra en la tabla 27.

Tabla 27: Resultados del primer agrupamiento del Amarradero 2

Concepto	Valor
Tiempo de truncamiento inicial	500,000
Número de <i>batches</i>	200
Tiempo entre <i>batches</i>	5000
Tiempo de truncamiento final	0
Covarianza estimada entre <i>batches</i>	0.98

Fuente: Ouput Analyzer; elaboración propia

Con esto se procedió a realizar un correlograma para determinar el número de observaciones que cada *batch* debe contener de tal manera que la correlación entre *batches* menor a 0.12.

Luego de realizar el correlograma se obtuvo que el numero observaciones por *batch* era de 25 (A_1).

Con estos resultados se procedió a realizar un nuevo agrupamiento por observaciones, las cuales fueron determinadas en el paso anterior, como se muestra en la tabla 28.

Tabla 28: Resultados del segundo agrupamiento del Amarradero 2

Concepto	Valor
Tiempo de truncamiento inicial	0
Número de <i>batches</i>	47
Número de observaciones por <i>batch</i>	25
Número de observaciones truncadas al final	22
Covarianza estimada entre <i>batches</i>	0.715
Covarianza igual a cero rechazada a favor a covarianza > 0 al nivel 0,05	

Fuente: Ouput Analyzer; elaboración propia

Luego se procedió a realizar un análisis de intervalos de confianza con un nivel de significancia de 95% con el fin de determinar si la confiabilidad es la adecuada. Del análisis se obtienen los siguientes resultados:

Half Width: 30.4

Número de Observaciones: 47 (A_2)

Aplicamos la siguiente fórmula para calcular el número de observaciones requeridas de acuerdo a un nuevo *half width*:

$$n^* = n \left(\frac{h}{h^*} \right)^2$$

Donde,

n^* , es el número de observaciones necesarias.

n , es el numero de observaciones o *batches* (A_2)

h , es el *half width* resultante

h^* , es el *half width* deseado

Reemplazando los datos:

$$n^* = 47 \left(\frac{30,4}{48} \right)^2 = 19$$

Como resultado se tiene que para un nuevo *half width* de 48 minutos se necesitan 19 observaciones.

Finalmente se procede a hacer el cálculo de la longitud de réplica (LR), para lo cual se usa la siguiente fórmula:

$$LR = \text{periodo de calentamiento} + n^* * A_1 * A_2$$

Reemplazando los datos:

$$LR = 500,000 + 19 * 5,000 * 47 = 4,965,000 \text{ minutos}$$

Como resultado de todo este procedimiento se tiene que la longitud de replica adecuada para la validación de resultados del Amarradero 2 es de 4,965,000 minutos.

Finalmente se concluye que las longitudes de replicas requeridas para validar adecuadamente el Amarradero 1 y el Amarradero 2 son 4,680,000 y 4,965,000 minutos respectivamente y para poder cumplir con ambos requisitos se escoge la mayor longitud de replica es decir 4,965,000 minutos.

5.2. Validación de resultados

Antes de proceder con la propuesta de mejora es necesario verificar si los resultados obtenidos son coherentes con respecto al sistema real.

Es importante revisar si la lógica del modelo cumple con ciertos parámetros de control que son los siguientes, número de naves atendidas, número de contenedores movilizados, tiempo total de atención de las naves.

A continuación se presenta el procedimiento de validación de estos parámetros:

5.2.1. Número de naves atendidas

Este indicador nos permitirá validar si el modelo esta simulando correctamente la atención de naves en el muelle.

A continuación se presenta la tabla 29 que muestra los resultados que arroja el modelo:

Tabla 29: Resultados de la cantidad de naves atendidas

Entidad	Contador
Naves atendidas	587

Elaboración propia

Del mismo modo que en el sistema real se han simulado la atención de dos tipo de naves “Gear” y “Gearless” al igual que dos tipos de contenedores, de veinte pies y de cuarenta pies. El reporte completo de la simulación del modelo se puede encontrar en el anexo A.

De acuerdo a la tabla 29 se han atendido 587 naves en siete meses, siendo el promedio 84 naves. Para decidir la validez de la media se recurre a una prueba de hipótesis.

En la siguiente tabla se presenta la demanda satisfecha mensual de naves que registro el muelle en siete meses.

Tabla 30: Demanda satisfecha mensual

Mes	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Naves	84	86	83	81	85	82	81

Fuente: La Empresa; elaboración propia

De la tabla 30 se tiene:

$$\bar{X} = 83 \quad S = 1.9518 \quad n = 7$$

Se plantean las siguientes Hipótesis:

$$H_0: \mu = 84$$

$$H_1: \mu \neq 84$$

Estadístico de prueba: Como la varianza poblacional es desconocida y el tamaño de muestra es menor a 30 se utiliza la distribución T-student en el cálculo del estadístico.

$$\frac{\bar{x} - \mu_0}{s / \sqrt{n}} = \frac{83 - 84}{1.9518 / \sqrt{7}} = -0.9682$$

Percentil: Con un nivel de confianza del 5%

$$t_{0.975}(6) = 2.447$$

Decisión: Como el estadístico de prueba no cae en $]-\infty, -2.447] \cup [2.447, \infty[$, región de rechazo correspondiente al nivel de significancia 0.05. Se puede afirmar que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto es válido el número promedio de 80 naves atendidas, y se ha simulado de forma satisfactoria la realidad del sistema portuario.

5.2.2. Número de contenedores movilizados

Este indicador nos permitirá validar si el modelo esta simulando correctamente la movilización de contenedores (carga y descarga) que ocurre en el muelle.

A continuación se presenta en la tabla 31 que muestra los resultados que arroja el modelo:

Tabla 31: Resultados de la cantidad de contenedores movilizados

Entidad	Contador
Contenedores movilizados	435,698

Elaboración propia

De igual manera acuerdo a la tabla 31 se han atendido 435,698 contenedores en siete meses, siendo el promedio 62,243 contenedores. Para decidir la validez de la media se recurre a una prueba de hipótesis.

En la tabla 32 se presenta la demanda satisfecha mensual de contenedores movilizados que registró el muelle en siete meses.

Tabla 32: Contenedores movilizados mensualmente

Mes	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Contenedores movilizados	40,377	43,662	42,792	63,759	59,019	60,868	64,818

Fuente: La Empresa; elaboración propia

De la Tabla 28 se tiene:

$$\bar{X} = 53,614 \quad S = 10,814 \quad n = 7$$

Se plantean las siguientes Hipótesis:

$$H_0: \mu = 62,243$$

$$H_1: \mu \neq 62,243$$

Estadístico de prueba: Como la varianza poblacional es desconocida y el tamaño de muestra es menor a 30 se utiliza la distribución T-student en el cálculo del estadístico.

$$\frac{\bar{X} - \mu_0}{S/\sqrt{n}} = \frac{53,614 - 62,243}{10,814/\sqrt{7}} = -2,1112$$

Percentil: Con un nivel de confianza del 5%

$$t_{0,975}(6) = 2,447$$

Decisión: Como el estadístico de prueba no cae en $]-w, -2,447] \cup [2,447, w[$, región de rechazo correspondiente al nivel de significancia 0.05. Se puede afirmar que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto es válido el número promedio de 62,243 contenedores movilizados, y nuevamente se puede decir que se ha simulado de forma satisfactoria la realidad del sistema portuario.

5.2.3. Tiempo total de atención de las naves

La validación del tiempo total de atención de las naves es ligeramente distinta a la presentada anteriormente ya que se trata de un sistema no terminal y por lo tanto primero es necesario realizar una réplica muy larga y adecuada para validar los

resultados de cada amarradero, la cual ya fue calculada anteriormente y es 4,965,000 minutos.

a) Amarradero 1

Se repite el mismo procedimiento realizado para el cálculo de la longitud de replica adecuada. Primero se grafica la evolución del promedio del tiempo de atención de las naves en el Amarradero 1. Al hacer esto se puede observar que hay un periodo de calentamiento de 1,000,000 minutos, los cuales fueron descartados.

Como todos los datos están correlacionados se debe de realizar un procedimiento de tal manera que se pueda obtener datos independientes para construir un intervalo de confianza.

Luego de determinar el tiempo de calentamiento este se separo de la corrida total realizando un proceso de truncamiento por *batches* en el cual se agrupa la data por tiempos de 5,000 minutos, como se muestra en la tabla 33:

Tabla 33: Resultados del primer agrupamiento del Amarradero 1 (LR óptima)

Concepto	Valor
Tiempo de truncamiento inicial	1'000,000
Número de <i>batches</i>	793
Tiempo entre <i>batches</i>	5000
Tiempo de truncamiento final	1
Covarianza estimada entre <i>batches</i>	0.99

Fuente: Ouput Analyzer; elaboración propia

Con esto se procedió a realizar un correlograma para determinar el número de observaciones que cada *batch* debe contener de tal manera que la correlación entre *batches* menor a 0.12.

Luego de realizar el correlograma se obtuvo que el numero observaciones por *batch* era de 221.

Con estos resultados se procedió a realizar un nuevo agrupamiento por observaciones, las cuales fueron determinadas en el paso anterior, como se muestra en la tabla 34:

Tabla 34: Resultados del segundo agrupamiento del Amarradero 1 (LG óptima)

Concepto	Valor
Tiempo de truncamiento inicial	0
Número de <i>batches</i>	20
Número de observaciones por <i>batch</i>	221
Número de observaciones truncadas al final	59
Covarianza estimada entre <i>batches</i>	0.693
Covarianza igual a cero rechazada a favor a covarianza > 0 al nivel 0,05	

Fuente: Oput Analyzer; elaboración propia

Luego se procedió a realizar un análisis de intervalos de confianza con un nivel de significancia de 95% con el fin de determinar si la confiabilidad es la adecuada. Del análisis se obtienen los siguientes resultados:

Intervalo de Confianza = [818;855] minutos

Como el promedio histórico es de 13:42 horas equivalente a 822 minutos cae en el intervalo de confianza se puede concluir que se ha simulado de forma satisfactoria la realidad de la atención del Amarradero 1.

b) Amarradero 2

De igual manera que para el Amarradero 1 se repite el mismo procedimiento realizado para el cálculo de la longitud de replica adecuada. Primero se grafica la evolución del promedio del tiempo de atención de las naves en el Amarradero 2. Al hacer esto se puede observar que hay un periodo de calentamiento de 1,000,000 minutos, los cuales fueron descartados.

Como todos los datos están correlacionados se debe de realizar un procedimiento de tal manera que se pueda obtener datos independientes para construir un intervalo de confianza.

Luego de determinar el tiempo de calentamiento este se separo de la corrida total realizando un proceso de truncamiento por *batches* en el cual se agrupa la data por tiempos de 5,000 minutos, como se muestra en la tabla 35:

Tabla 35: Resultados del primer agrupamiento del Amarradero 2 (LR óptima)

Concepto	Valor
Tiempo de truncamiento inicial	1'000,000
Número de <i>batches</i>	793
Tiempo entre <i>batches</i>	5000
Tiempo de truncamiento final	1
Covarianza estimada entre <i>batches</i>	0.99

Fuente: Ouput Analyzer; elaboración propia

Con esto se procedió a realizar un correlograma para determinar el número de observaciones que cada *batch* debe contener de tal manera que la correlación entre *batches* menor a 0.12.

Luego de realizar el correlograma se obtuvo que el numero observaciones por *batch* era de 231.

Con estos resultados se procedió a realizar un nuevo agrupamiento por observaciones, las cuales fueron determinadas en el paso anterior, como se muestra en la tabla 36:

Tabla 36: Resultados del segundo agrupamiento del Amarradero 2 (LG óptima)

Concepto	Valor
Tiempo de truncamiento inicial	0
Número de <i>batches</i>	19
Número de observaciones por <i>batch</i>	231
Número de observaciones truncadas al final	165
Covarianza estimada entre <i>batches</i>	0.849
Covarianza igual a cero rechazada a favor a covarianza > 0 al nivel 0,05	

Fuente: Ouput Analyzer; elaboración propia

Luego se procedió a realizar un análisis de intervalos de confianza con un nivel de significancia de 95% con el fin de determinar si la confiabilidad es la adecuada. Del análisis se obtienen los siguientes resultados:

Intervalo de Confianza = [799;838] minutos

Como el promedio histórico es de 13:22 horas equivalente a 802 minutos cae en el intervalo de confianza se puede concluir que se ha simulado de forma satisfactoria la realidad de la atención del Amarradero 2.

Como todos los cuatro indicadores validaron satisfactoriamente se puede concluir que el sistema se ha simulado de manera adecuada y se puede proceder con la propuesta de mejora.



CAPÍTULO 6. PROPUESTA DE MEJORA

Actualmente el tiempo de estadía de un buque en el muelle es de 13.5 horas en promedio lo que ocasiona una tasa de ocupabilidad mayor a la permitida.

Además como se mencionó en el capítulo anterior la utilización de las grúas RTG es bastante alta y el tiempo de espera para que un contenedor puede ser movilizado dentro del patio por una de ellas es de aproximadamente 130 minutos.

Por otro lado dentro de los contratos de concesión se estipulan los niveles máximos de utilización del muelle, los cuales deben ser respetados para no ser multados o en el peor de los casos perder la concesión. Es por ello que en el presente capítulo se presentan medidas que buscan reducir el tiempo de los buques dentro del sistema con lo cual se reduciría la tasa de ocupabilidad dentro de muelle; además de reducir las utilidades de las grúas de patio.

6.1. Controles del sistema

Dentro de la optimización en el OptQuest se necesita definir los recursos que irán variando su capacidad en cada simulación que haga el sistema para ir buscando la que genere la solución óptima.

Los rangos de variación de la capacidad son definidos por el usuario determinando el mínimo y el máximo de valores que esta podrá tomar.

Para este caso se han definido tres tipos distintos de control:

- a) El primer control son las grúas PostPanamax, como se sabe ya se tiene un valor inicial de estas el cual no puede ser variado ya que son grúas que se encuentran actualmente en funcionamiento; por lo tanto, se definieron como valor mínimo seis y como máximo nueve. Es decir se analizará dentro de las posibles soluciones adquirir hasta tres grúas PostPanamax más.
- b) El segundo grupo de controles está constituido por las grúas RTG. Dentro de este grupo no se variará la capacidad de todas las grúas que actualmente se encuentran en el patio, lo que se hace es coger una de cada una de las cuatro zonas de patio definidas en el sistema. Además de las cuatro grúas dos varían

sus posibles valores entre uno y dos y las otras entre uno y tres esto debido a que hay mayor espacio en las zonas uno y cuatro que podrían aprovecharse para el montaje de estas grúas.

- c) Finalmente el último control es el recurso ficticio que representa las grúas PostPanamax asignadas a cada contenedor para realizar los procesos de carga y descarga. Solo se tomarán en cuenta los recursos con capacidad tres y cuatro ya que en promedio son la cantidad de grúas asignadas con mayor probabilidad dentro del sistema.

6.2. Restricciones para la optimización

Dentro de las restricciones planteadas para las corridas de optimización se tomaron en cuenta las siguientes:

- $RTG1 + RTG10 + RTG11 + RTG15 \leq 9$.-

Esta restricción hace referencia a la cantidad de grúas de patio máxima que se pueden tener en total. El número máximo es nueve ya que originalmente se cuenta con una de cada una y se pueden adquirir, por cuestiones de espacio, hasta cinco más.

- $grua3 + grua4 \leq 3$.-

Esta restricción es para el recurso ficticio, se restringe que la cantidad máxima entre el que tiene capacidad tres y capacidad cuatro sean menor que nueve; esto debido a que si se tuviera dos de cada uno superaría el número máximo de variación para las grúas PostPanamax definidas dentro de los controles lo cual produciría una inconsistencia dentro de la lógica planteada.

- $Utilización (RTGI) < 0.80$.-

Finalmente esta restricción es para que la utilización de las grúas de patio no supere el 0.8 ya que como vimos en puntos anteriores esta, en algunos casos, era muy alta.

6.3. Planteamiento de la función objetivo

La función objetivo tiene como finalidad reducir el tiempo de estadía en muelle de los buques que llegan a cada uno de los amarraderos, al cada uno tener tiempos independientes y diferentes la función objetivo será minimizar la suma de ambos tiempos. Al minimizar la suma se está minimizando cada uno de sus componentes.

La función objetivo planteada es la siguiente:

$$\text{MIN } (\text{Amarradero1} + \text{Amarradero2})$$

Los valores amarradero1 y amarradero2 son medidos con el bloque *tally* al final del modelo y son el valor promedio del tiempo transcurrido desde que el buque termina de amarrar y desamarrar del amarradero 1 y 2 respectivamente.

6.4. Solución en OptQuest

Antes que el OptQuest empiece a correr para obtener la solución óptima según la función definida y los controles a evaluar se deben definir dentro de la pestaña *Options* la cantidad de simulaciones necesarias para poder evaluar todas las posibles soluciones resultantes de la combinación de todos los posibles valores que puedan tomar los controles durante el proceso. Para este caso se definieron ciento cincuenta simulaciones.

Luego de esto se procede a correr el modelo, cuando el *software* terminó de evaluar todas las posibles soluciones dio como resultado lo mostrado en la tabla 37:

Tabla 37: Solución óptima

Control	Cantidad
R_Grua_PostPanamax	6
RTG1	3
RTG10	1
RTG11	2
RTG15	2
Grua3	1
Grua4	1

Elaboración propia

De los resultados podemos observar que la solución se encuentra en aumentar la cantidad de grúas RTG disponibles para que el movimiento de contenedores dentro del patio sea más fluida.

Esta solución nos da un resultado de 509.44 minutos para nuestra función objetivo, es decir en promedio la suma del tiempo de estadía de los buques en los amarraderos es 509.44, lo cual mejora notablemente el tiempo anterior el cual superaba los 1500 minutos en promedio.



CAPÍTULO 7. EVALUACIÓN ECONÓMICA

En este capítulo se estimará el costo de implementación de las mejoras propuestas en el capítulo anterior. Es importante resaltar que estas son mejoras necesarias y obligatorias para mejorar el servicio en el muelle y no perder la concesión del mismo, por lo que no se hará el cálculo de la estimación de beneficios ya que además de no estar relacionados con la capacidad del muelle, ya que la demanda depende del mercado, son irrelevantes por lo antes expuesto.

7.1. Estimación de costos de implementación de las mejoras propuestas

7.1.1. Costos de preparación del modelo

Como inversión inicial se considera la adquisición de la Licencia del Arena Professional 14.0 con un costo de US\$ 9,314 (al tipo de cambio 2.58) tal como se muestra en la siguiente tabla. También se debe de considerar el sueldo del analista encargado en desarrollar el modelo, para tal fin dicha persona deberá dedicarse a tiempo completo de manera que pueda hacer los ajustes requeridos para simular la realidad del sistema. El sueldo que recibirá este profesional será de S/. 3,000.

Basados en la experiencia adquirida en el desarrollo del presente trabajo se puede afirmar que es posible desarrollar un modelo que represente adecuadamente la realidad del sistema en un periodo aproximado de nueve meses. En la tabla 38 se muestra el resumen de costos estimados para la preparación del modelo:

Tabla 38: Costo de preparación del Modelo

Concepto	Costo Estimado
Arena Professional 14.0	S/. 24,030
Analista	S/. 27,000
TOTAL	S/. 51,030

Fuente: <http://www.arenasimulation.com/Buy.aspx>; elaboración propia

7.1.2. Costo de implementación de las mejoras propuestas

Se deben considerar los costos asociados a la adquisición de las cinco grúas de patio (RTG), a continuación en la tabla 39 se presenta el detalle de los costos considerando que las grúas deben de quedar operativas en muelle:

Tabla 39: Costo de implementación de las mejoras prop. (valores solarizados, tipo de cambio 2.58)

Concepto	Costo Estimado
Grúa de Patio (RTG)	S/. 3,870,000
Certificado de Supervisión de Importaciones (*)	S/. 38,700
Arancel Ad Valorem	S/. 453,600
Impuesto General a las Ventas	S/. 680,400
Impuesto de Promoción Municipal	S/. 75,600
TOTAL	S/. 5,027,400
TOTAL x cinco grúas de patio	S/. 24,985,800

Fuente: <http://www.mincetur.gob.pe/comercio/Legal/DS-035-97-EF.htm>; elaboración propia

(*) Solo se pagará una vez, ya que el pago engloba a el certificado de supervisión por la importación de todas las grúas; no es necesario pagar por cada una de ella.

Si se totalizan los costos de preparación del modelo y de implementación de las mejorar propuestas se concluye que el costo total para este proyecto de mejora en el muelle es de S/. 25,037,100.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

- La importancia de una simulación de eventos discretos radica en la posibilidad de diseñar modelos complejos los cuales representen procesos de la realidad y además en obtener información real que permita entender y explicar el desempeño de sistemas o procesos bajo ciertas condiciones de operación.
- Actualmente los tiempos de estadía en cada amarradero son en promedio de 13.5 horas luego de realizar la optimización propuesta, la cual radica en el aumento de grúas RTG dentro del patio de maniobras se obtiene que el nuevo tiempo promedio sería de 4.2 horas lo que representa una reducción del 69% del tiempo original, esto permite concluir que la principal problemática actual es la cantidad de grúas RTG dentro del patio de maniobras.
- El desarrollo del modelo y análisis de datos de entrada son aspectos importantes a tomar en cuenta cuando se realizan estudios mediante simulación de eventos discretos ya que alguna falla en alguno de estos aspectos generaría resultados ajenos a la realidad con lo cual se podrían tomar decisiones erróneas sobre el procesos estudiado.
- La precisión en el análisis de datos es primordial en la investigación ya que cuanto más ajustada es la función estadística encontrada más precisos serán los valores que tomen las demoras, intervalos de creación y asignaciones de valores para las variables y atributos dentro del modelo.
- La principal virtud que tiene el modelo luego de haber encontrado que la longitud de réplica y periodo de calentamiento adecuado es que cualquier evento ocurrido después de esto no debe generar picos en ninguno de los indicaros establecidos.

- Antes de empezar a correr el OptQuest en busca de la optimización se deben definir muy bien las restricciones y la función objetivo deseada ya que de esto dependerá la factibilidad de la mejora encontrada por el sistema.
- El periodo de retorno de la inversión para el desarrollo de la inversión de no puede ser cuantificado ya que no son costos ligados directamente a la demanda de contenedores, pero sí debe considerarse importante que se reduzca la utilización, además de cada amarradero, de las grúas RTG con las que se cuenta actualmente ya que esto generará un mejor desempeño de estas y un periodo de vida útil mayor con una inversión total de S/. 25,037,100.

8.2. Recomendaciones

- Se debe tomar en cuenta la necesidad de reproducir este experimento cada cierto intervalo de tiempo ya que por cada mejora planteada el proceso varía y se generan nuevos cuellos de botella.
- Realizar futuros análisis tomando en cuenta nuevas variables que permitan predecir problemáticas a futuro como el aumento del flujo de contenedores debido a nuevos tratados de libre comercio firmados por el gobierno que aumentaran la demanda notablemente.
- Ampliar el alcance del estudio no sólo al proceso de carga y descarga de contenedores sino también incluir dentro de la simulación procesos administrativos que puedan impactar dentro del desempeño total de las operaciones dentro de la empresa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFARO MEZA, Ténesis Jesús
2008 *Desarrollo de un modelo de simulación en una empresa papelera para mejorar su productividad.* Tesis de licenciatura en Ciencias en Ingeniería con mención en Ingeniería Industrial. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- BANKS, Jerry; CARSON II, Jhon; NELSON, Barry; NICOL, David
2010 *Discrete-Event System Simulation.* Quinta edición. New Jersey: Pearson
- CONTRERAS, M., BAESLER, F., & MALDONADO, L.
2010 *Optimización de las operaciones portuarias mediante simulación y metodología de superficie de respuesta.* Revista Ingeniería Industrial, 9(2), 73-91.
- CÓRDOVA ZAMORA, Manuel
2008 *Estadística Aplicada.* Lima
- KELTON, W. David; SADOWSKI, Randall; STURROCK, David
2008 *Simulation with Arena.* Cuarta edición. New York: McGraw-Hill
- MONTGOMERY, Douglas C.
2009 *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería.* Segunda edición. México: Limusa Wiley
- PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
2011 *Guía Output Analyzer*
- RAFFO TOWNSEND, Gonzalo
2011 *Aplicación de la simulación discreta en la asignación de puntos de espera para una empresa que brinda el servicio de ambulancias.* Tesis de licenciatura en Ciencias en Ingeniería con mención en Ingeniería Industrial. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- ROCKWELL AUTOMATION
2007 *OptQuest for Arena, User Guide*
- ROSS, Sheldon M.
2002 *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencia.* Segunda edición. México: McGraw-Hill
- TORRES VEGA, Pedro Jesús
2010 *Simulación de sistemas con el software.* Lima: Universidad de Lima