

Trabajo de grado en modalidad de investigación

## **Diseño de un algoritmo para determinar la estrategia de almacenamiento y programación de manipulación de contenedores en terminales marítimos.**

Karen Andrea Garzón Jiménez<sup>a,c</sup>, María Camila Manrique Parra<sup>a,c</sup>, Paola Andrea Peña Vargas<sup>a,c</sup>, Daniela Román Beltrán<sup>a,c</sup>  
Nicolás Rincón García<sup>b,c</sup>

*<sup>a</sup>Estudiante de Ingeniería Industrial*

*<sup>b</sup>Profesor, Director del Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial*

*<sup>c</sup>Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia*

---

### **Resumen de diseño en Ingeniería.**

Since the rapid growing of the economy and globalization, industry is searching for more efficient types of transportation. Because of a low-cost shipping (compared to air freight) and size restrictions, ocean freight shipping is the most common way of imports transportation. Nevertheless, ports logistics and infrastructure represent an obstacle due to operational and high-risk decisions complexity.

That said, the objective of the following document is to present an operational solution of the cargo from the moment it is on the boat until they are stored in a strategic position. As a result of this solution, cargo downtime and cargo truck wait time will be reduced considerably. This improvement will deliver big economic savings to all the parties and operation will be more efficient.

This study will evaluate two different metaheuristics: Tabu Search (TS) and Genetic Algorithm (GA), in order to propose the best storage strategy in a port. Results of both metaheuristics will be compared evaluating performance and identifying the minor downtime of both proposals.

A modeled simulation created, represent a LIFO method to simulate how cargos will be moved in the port. After simulation LIFO method and the original proposal results were compared to demonstrate if the proposal will reduce cargo downtime. As a result, proposal achieved a 22% downtime reduction.

Comparing both metaheuristics results demonstrate that Tabu Search (TS) have a 0.25%-time reduction versus Genetic Algorithm (GA). Finally, Tabu Search (TS) proposal presents a 1,56% time reductions versus original proposal. Comparing this results with LIFO method we conclude that our proposal improves wait time / downtime around 23,56%.

*Key words: Ports logistic, Cargo, Strategic position, Tabu search, Genetic algorithm, Simulation*

---

## 1. Justificación y planteamiento del problema

Los puertos marítimos son una base indispensable en el progreso del comercio y la competitividad, ya que representan un porcentaje importante de intercambio de bienes entre países (Informe Nacional de Competitividad, 2015). Gracias a dichos puertos, las diferentes empresas pueden conectarse fácilmente con los mercados nacionales e internacionales a través de cadenas de suministro fiables. Los países con logística ineficiente en dichos puertos enfrentan altos costos, tanto en términos de tiempo como de dinero, en el comercio internacional y las cadenas de suministro globales (World Bank, 2016).

Los puertos marítimos, además de permitir la importación-exportación de carga mediante contenedores, son un modelo de transporte intermodal, pues en ocasiones, cuando un contenedor requiere de más de un viaje, los puertos son usados también como centro de almacenamiento, debido a que son útiles para conectar transporte marítimo con transporte terrestre, y el contenedor debe esperar a ser cargado para realizar su siguiente viaje (Zhang, Liu, Wan, Murty, & Linn, 2002).

Los principales conceptos logísticos que afectan un puerto marítimo son: la eficiencia en los procesos de despacho de aduanas, la calidad de la infraestructura con relación a la distribución de zonas dentro del puerto, y la asignación de contenedores (ANIF, 2014).

En cuanto a los procesos aduaneros, Colombia, por ejemplo, posee un uso limitado de tecnologías de información ya que no cuenta con una buena plataforma electrónica que permita llevar registro de las actividades realizadas durante la jornada y hacer seguimiento en tiempo real. Los errores en documentación son muy frecuentes, ya que en algunos casos no coincide lo que se registra con lo que se encuentra en el embalaje de la mercancía, lo cual requiere una inspección de esta y un cambio en los procedimientos. Además, se cuenta con muy poco personal aduanero para realizar todas las solicitudes y se genera una gran rotación de cargos por lo que el personal no se encuentra muy bien capacitado (ANIF, 2014).

Respecto a la calidad de la infraestructura, esta depende de las capacidades con las que cuenta el puerto para realizar las diferentes actividades. La existencia de escasas zonas de parqueaderos, de antepuertos y de zonas de actividades logísticas, independientes de las zonas de almacenamiento, conllevan al aumento en el tiempo de espera, lo cual representa un costo significativo en puertos, aumentando directamente los costos de importar-exportar. Además, muchas veces no se cuenta con las zonas de almacenamiento que se requiere, por ejemplo, la mercancía de alimentos requiere ser almacenada en lugares con mayor cuidado, entre otros tipos de mercancía que requieren diferentes precauciones (ANIF, 2014).

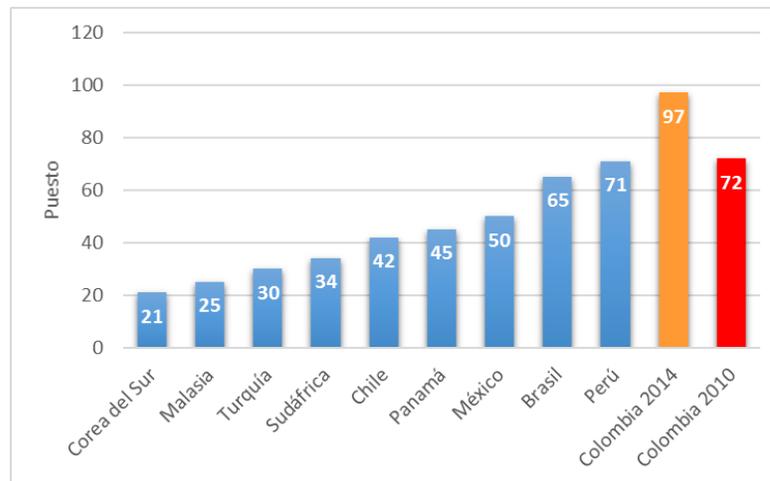


Figura 1. Índice de desempeño logístico año 2014

Fuente: Desempeño logístico: infraestructura, transporte y logística

Tomada de: <http://www.colombiacompetitiva.gov.co/prensa/informes/CPC-Informe-Nacional-de-Competitividad-2014.pdf>

Como se observa en la figura 1, según el Índice de Desempeño Logístico del Banco Mundial, el cual refleja las percepciones de la logística de un país, Colombia se posicionó en el puesto 97 -entre 155 países- lo que quiere decir que, para el año 2014 más del 62% de países tenían un mejor desempeño logístico. Es importante resaltar que, aunque en el transcurso del lapso de tiempo, entre los años 2010 y 2014, la posición de Colombia empeoró, dicho país ha tenido ciertos avances en temas de infraestructura y logística portuaria, pero estos no han sido suficientes (Informe Nacional de Competitividad, 2015).

En cuanto a tiempos de manejo de carga, el Banco Mundial menciona que, Colombia ha tenido un gran avance puesto que en los años 2000-2011 el número de contenedores transportados en estos puertos se triplicaron, dado que se movilizaban 790.000 y en este momento 2.6 millones de estos mismos. No obstante, la posición en la que se ubica Colombia en el índice de desempeño logístico, con respecto a Brasil, México y Chile es significativamente baja (Informe Nacional de Competitividad, 2015). Además, es preocupante el costo de exportar un contenedor desde Colombia, el cual asciende a US\$2.350 superando las cifras de los países anteriormente nombrados. Por lo anterior, se puede afirmar que Colombia hasta el momento no ha logrado aprovechar adecuadamente el uso de los contenedores (ANIF, 2013).

Analizando el problema de manipulación de contenedores, se encontró que este es uno de los más críticos, ya que el método que se realiza para la asignación de contenedores en el área de almacenamiento puede generar una gran demora, debido a que la ubicación en la que se encuentren los contenedores puede aumentar o disminuir significativamente el tiempo que tarde un buque en ser cargado o descargado.

El problema radica desde el momento en el que el contenedor es descargado, pues se debe determinar qué ruta va a seguir el elemento de manipulación de carga usado para trasladar este, hasta llegar a la posición donde va a ser almacenado, siendo la posición en la que se encuentre, un factor estratégico para la optimización del tiempo que va a tardar el buque en el puerto. Generalmente los contenedores se almacenan en pilas y si se requiere la manipulación de uno que se encuentre en la parte inferior, el tiempo que se tarda en retirar los que se encuentran ubicados sobre este puede incrementar en gran cantidad el tiempo total de la manipulación de los contenedores; a este tiempo se le conoce como tiempo de configuración, y al ser tan representativo en el tiempo total, se debe escoger la posición más conveniente para reducir este tiempo (Kozan & Preston, 2006).

En los últimos años las operaciones de los terminales portuarios han tenido cambios significativos en las bodegas de contenedores, permitiendo obtener el máximo provecho de la posición de almacenamiento. Al controlar esta área de una manera óptima, se reducirá a su vez el tiempo necesario para que los diferentes elementos técnicos de manipulación de carga trasladen los contenedores de la zona de almacenamiento a la zona de carga de los buques (Kozan & Preston, 2006). Existen diferentes tipos de manipulación de carga, y otro aspecto que se debe tener en cuenta para lograr una buena programación en la manipulación de contenedores es escoger cuál de estos se va a usar; en el anexo 1 se pueden observar algunos de los equipos de manipulación de carga existentes.

Actualmente, uno de los transportes más usados es el transporte marítimo debido a las grandes cantidades que por este medio se pueden manejar, pero una de las gestiones más complejas que se pueden realizar, son las actividades portuarias (Eliiyi, y otros, 2008). Actualmente, los puertos marítimos cuentan con volúmenes mayores de contenedores, pero no con la posibilidad de expansión de sus áreas. A partir de esto nace la estrategia de manipulación de contenedores como alternativa para ser más eficientes al interior de un puerto logrando aumentar la capacidad de este, y de esta forma lograr adaptarse a las cantidades que se demandan en la actualidad (Saanen & Valkengoed, 2005).

A partir de los problemas descritos anteriormente, se determinó que el problema de manipulación de contenedores al interior de un puerto es uno de los más significativos, debido a que, si se logra una estrategia de almacenamiento apropiada, se conseguirán reducir los tiempos de espera que estos pueden llegar a representar. Este será el tema en el cual se enfocará el presente documento ya que, además de ser un problema representativo, no ha sido estudiado por muchos autores (Kozan & Preston, 2006), sin embargo, a partir de la ingeniería, se podrá abordar el problema mediante herramientas de simulación y optimización, con el objetivo de minimizar el tiempo de manejo de estos.

## 2. Antecedentes

Una buena manipulación de contenedores en un puerto es de vital importancia, ya que la ubicación en la que se encuentre el contenedor puede aumentar o disminuir significativamente el tiempo que tardara un buque en ser cargado o descargado. Este problema ha sido estudiado por algunos autores que aportan al estudio de este documento, ya que lo han abordado a partir de las herramientas que se desean utilizar.

El tiempo de las operaciones de carga y descarga dentro de un puerto es representativo ya que los contenedores deben almacenarse de tal manera que la manipulación de estos sea mínima, tanto a la hora de almacenarse como a la hora de retirarlos. Preston y Kozan (1999), estudiaron diferentes métodos con el objetivo de aprovechar el área de almacenamiento, reduciendo el tiempo necesario que los equipos requeridos en los patios demandan para trasladar los contenedores del área de almacenamiento al área de distribución, con el fin de cargarlos a los buques o camiones. Uno de los principales objetivos de este artículo fue minimizar dicho tiempo. Existen otras alternativas para abordar la manipulación de contenedores, como se demuestra en el estudio efectuado por (Legato, Mazza, & Triunfo, 2010), en el cual desarrollan un modelo de optimización basado en simulación con el fin de obtener una asignación y secuencia óptima de las zonas del puerto procesadas por un número de grúas disponibles. Los experimentos llevados a cabo por medio de la simulación mostraron la posibilidad de establecer decisiones lógicas, evaluar las mismas en un marco real dinámico y estocástico.

Como fue mencionado anteriormente, la ubicación en la que se encuentra un contenedor es un factor determinante dentro de un puerto marítimo. Por ejemplo, Preston y Kozan (2006), decidieron estudiar la forma en que los contenedores debían almacenarse de manera que se minimice la cantidad de manipulación necesaria para colocar dichos contenedores en el área de almacenamiento y retirarla cuando sea necesario. Por lo tanto, el problema que se investiga minimiza el tiempo total de producción, el cual es el tiempo de manipulación para los contenedores de los buques en el puesto de atraque y el tiempo de transferencia de los contenedores al área de almacenamiento. De igual manera, Bazzazi, Safaei & Javadin (2008) resuelven el problema del almacenamiento temporal de contenedores que entran y salen de un puerto marítimo, más conocido como asignación de espacio de almacenamiento el cual es llamado (SSAP). Adicionalmente, un estudio realizado por Jiang, Chew, Lee & Tan (2012), busca administrar la zona de almacenamiento en un puerto marítimo de manera más eficiente, mediante la asignación adecuada de contenedores, por medio de un modelo de programación de enteros mixtos basado en la estrategia de espacio compartido que incorpora un MIP y una heurística.

Por otra parte, Rodríguez-Molins, Salido, & Barber (2011), proponen una planificación inteligente para la asignación de contenedores donde minimizaron el número de movimientos de reorganización para asignar todos los contenedores seleccionados en la parte superior de las pilas en un puerto. Este estudio tiene como objetivo organizar los bloques de un determinado diseño, especificando la posición final de cada bloque, enseguida de esto para modelar el problema utilizaron el lenguaje de codificación PDDL para definir las características comunes para los problemas de este dominio y describir las características de cada problema. De esta manera, H. Petering (2013) realizó una investigación en la cual mostro un sistema que envuelve las actividades desarrolladas en un terminal de transbordo de buque a barco, con el fin de tomar decisiones de almacenamiento en tiempo real, centrándose en los problemas operacionales. Se considera un puerto con poca área, donde los contenedores están apilados y las grúas son manipuladas manualmente por operarios. Por medio de un modelo de simulación de evento discreto totalmente integrado, de un puerto marítimo, se busca probar el rendimiento del sistema en términos de una métrica de rendimiento global utilizada por industria-GCR (*GCR es la tasa bruta de grúas, que mide la cantidad promedio de contenedores elevados por una grúa durante una hora de trabajo*).

La tabla 1 presenta el resumen de los artículos consultados con el problema y desarrollo abordado por cada uno de los autores nombrados anteriormente.

ARTÍCULO	PROBLEMA	DESARROLLO
(Kozan & Preston, 1999)	Estudiaron diferentes métodos con el objetivo de aprovechar el área de almacenamiento, reduciendo el tiempo necesario que los equipos requeridos en los patios.	Emplearon técnicas de algoritmos genéticos (GA) para minimizar la transferencia de contenedores.
(Kozan & Preston, 2006)	Investigaron la forma en que los contenedores debían almacenarse de manera que se minimice la cantidad de manipulación necesaria para colocar dichos contenedores en el área de almacenamiento y retirarla cuando sea necesario	Se utilizaron dos Metaheurísticas para CLM un algoritmo genético (GA) y para CTM un algoritmo tabú.
(Bazzazi, Safaei, & Javadian, 2008)	Investiga el problema de almacenamiento temporal de los contenedores que entran y salen del puerto marítimo.	Se utiliza un algoritmo Genético (GA).
(Legato, Mazza, & Triunfo, 2010)	Obtener una asignación y secuencia optima de las zonas del puerto procesadas por un numero de grúas disponibles.	Se desarrolla un modelo de optimización basado en simulación.
(Rodríguez-Molins, Salido, & Barber, 2011)	Busca minimizar el número de movimientos de reorganización de contenedores.	Diseño de una heurística dependiente del dominio para obtener una configuración adecuada.
(Jiang, Chew, Lee, & Tan, 2012)	Se busca administrar el patio de almacenamiento en un puerto marítimo de manera más eficiente, mediante la asignación adecuada de contenedores.	Modelo de programación de enteros mixtos y experimentos numéricos.
(Petering, 2013)	La investigación estudia un sistema que envuelve las actividades desarrolladas en un terminal de transbordo de buque a barco, con el fin de tomar decisiones de almacenamiento en tiempo real, centrándose en los problemas operacionales.	Por medio de un modelo de simulación de evento discreto totalmente integrado.

Tabla 1. Resumen antecedentes

Teniendo en cuenta los antecedentes nombrados anteriormente, se logra evidenciar que el problema de almacenamiento y programación de manipulación de contenedores en terminales marítimos es representativo y ha sido estudiado por diferentes autores desde varios ámbitos, los cuales proponen diversas soluciones similares a las planteadas en este documento. Por lo tanto, el aporte de esta investigación se centra en un algoritmo para determinar la estrategia de almacenamiento con el fin de minimizar los tiempos de configuración y manipulación, el cual fue simulado con el fin de proponer una solución en un marco real y dinámico.

### 3. Objetivos

*Diseñar un algoritmo para determinar la estrategia de almacenamiento y programación de manipulación de contenedores en terminales marítimos, con el fin de minimizar los tiempos de configuración y manipulación.*

- Diseñar un algoritmo para resolver el problema de ubicación de contenedores, traslado y almacenamiento de los mismos dentro de un puerto.

- Diseñar un modelo de simulación que permita evaluar el desempeño del algoritmo diseñado para la ubicación de contenedores, traslado y almacenamiento de estos, en un entorno de variabilidad.
- Medir el impacto de la variabilidad de los resultados obtenidos por el algoritmo diseñado, mediante el modelo de simulación.

#### 4. Metodología

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACTIVIDAD	METODOLOGÍA	HERRAMIENTA DE SOLUCIÓN	ENTREGABLE
Diseñar un algoritmo para resolver el problema de ubicación de contenedores, traslado y almacenamiento de los mismos dentro de un puerto.	Definición de algoritmo a desarrollar.	A partir de la revisión de la literatura se dedujo que diferentes autores han resuelto problemas similares mediante las metaheurísticas seleccionadas. Aunque estas no aseguran encontrar una solución óptima al problema, existe evidencia empírica de que encontrarán una solución factible.	Visual Basic.	Metaheurística.
	Definir las variables y parámetros e identificar posibles restricciones que serán usados en el algoritmo.	Una vez identificados los problemas críticos dentro un puerto, se escogió el problema a tratar, seguido de esto se definieron ciertos lineamientos para poder obtener una solución acercándose lo más posible a la realidad.		
	Programar la metaheurística en Visual Basic.	A partir del planteamiento de una solución inicial para lograr llevar a cabo las metaheurísticas propuestas, se diseñó una Función Objetivo mediante la herramienta de Visual Basic la cual calcula el tiempo de traslado de los contenedores. Las metaheurísticas buscan mejorar esta FO.		
	Revisar el funcionamiento de la metaheurística.	Ambas metaheurísticas fueron ejecutadas repetidas veces para verificar su funcionamiento.		
Diseñar un modelo de simulación que permita evaluar el desempeño del algoritmo diseñado para la ubicación de contenedores, traslado y almacenamiento de estos, en un entorno de variabilidad.	Definir la estructura física del puerto donde se diseñará modelo.	A partir de la revisión de estructuras físicas de puertos marítimos, se determinó el diseño de una estructura general donde, existiera una zona de descarga, una de almacenamiento y se observara el funcionamiento de elementos de manipulación de carga.	FlexSim	Modelo de simulación
	Formulación del modelo	Mediante el uso de programación en FlexSim, el apoyo de los diferentes elementos y definición de sus características (label), se estableció la secuenciación que debe cumplir cada contenedor que permanezca en el sistema.		

	Definir distribución de probabilidad para los tiempos de carga y descarga de contenedores.	Ya que el tiempo de descarga pretende ser lo mas ágil para disminuir el tiempo que tarde el buque atracado, se concluyo que el descargue no tiene un orden, ya que el posicionamiento del contenedor es aleatorio en esta zona. En cuanto a la carga de contenedores o despacho de estos, se definió que sería mediante citas asignadas a los camiones, según las horas disponibles, por lo cual también se tomo como un orden aleatorio.		
	Implementación del modelo en FlexSim.	Una vez obtenidos los resultados mediante las metaheurísticas diseñadas, y el modelo de simulación se encontraba estructurado, se procedió a insertar las soluciones obtenidas mediante tablas globales.		
Medir el impacto de la variabilidad de los resultados obtenidos por el algoritmo diseñado, mediante el modelo de simulación.	Planteamiento de variables	Investigando las variables que afectan el congestionamiento de un puerto, estas se tuvieron en cuenta para obtener un mejor resultado en los modelos diseñados.	FlexSim (Dashboards)	Informe
	Interpretar los datos que arroja la simulación.	Mediante el uso de Dashboards se realizó un análisis de los datos obtenidos por el modelo de simulación, encontrando el tiempo promedio que dura el sistema y los intervalos en el cual varia este.		

Tabla 2. Resumen metodología

Para entender el problema y explicar el diseño de la solución planteada se tomó como referencia la metodología DMADV (Norma ISO 13053). Es una metodología de extensa aplicación para la resolución de problemas, la cual ayuda a prever y eliminar los defectos potenciales durante el proceso de diseño, dicha metodología cuenta con 5 pasos para su ejecución: definir, medir, analizar, diseñar y verificar (ISO, 2011).



Figura 2. Diagrama DMADV

#### 4.1. Definir

Investigando y analizando los diferentes problemas a los que se enfrenta un puerto hoy en día, se identificó que la manipulación de contenedores es uno de los más representativos (Kozan & Preston, 2006) ya que determinar la adecuada secuenciación que seguirán los contenedores es uno de los principales retos (Kozan & Preston, 2006). El termino de secuenciación enlaza las diferentes decisiones que se deben tomar desde el momento en que un contenedor llega a un puerto para ser descargado hasta que sale del mismo, determinando cuál elemento de manipulación de carga será empleado para operar y teniendo en cuenta cada movimiento que requiera el contenedor para ser manipulado(Kozan & Preston, 1999).

El objetivo del puerto es atender lo más rápido posible el buque durante el descargue ya que el costo más representativo en un puerto es el que debe pagar un buque por estar atracado el cual aproximadamente es de 27.340,09 USD (Ver anexo 5). Debido a esto, se procede a descargar cada contenedor ubicándolo en una zona que no cuenta con ningún orden (zona de descarga) pero sirve para agilizar este proceso. Además, influye el tipo de elemento de manipulación de carga que se esté usando, ya que algunos permiten una mayor agilidad dependiendo del proceso que

se esté realizando. Luego de esto, se procede a trasladar los contenedores a la zona donde permanecerán almacenados hasta ser recogidos. Cuando el importador requiere su carga, solicita una cita que el puerto asigna según disponibilidad. En el momento en que se cumple con dicha cita, finaliza el proceso.

Este documento se enfocará en resolver el problema descrito tomando como punto de inicio desde que los contenedores ya se encuentran ubicados en la zona de descarga hasta que los camiones recogen los contenedores cumpliendo con las citas asignadas. Por medio de este documento se busca lograr una reducción en el tiempo total de traslado de los contenedores, siendo esta la métrica de la presente investigación.

## 4.2. Medir

Actualmente en los puertos marítimos, existen diferentes formas de trasladar los contenedores de la zona de descarga a la zona de almacenamiento. Un ejemplo de esto, y el más usado, es el método LIFO (last-in, first-out), el cual consiste en que, el último contenedor en ser descargado en la zona de descarga será el primer contenedor en ser trasladado a la zona de almacenamiento (Rodrigue-Molins, Salido, & Barber, 2011).

Para tener un mejor acercamiento al método LIFO y lograr entender de una mejor manera su comportamiento, se representó a través del modelo de simulación diseñado, el cual será explicado más adelante. El escenario en el cual se va a desarrollar este documento tiene en cuenta los siguientes supuestos:

- Se cuenta con una zona de descarga y una zona de almacenamiento. Cada zona cuenta con unos espacios establecidos para permitir el paso de camiones o grúas transportadores, los cuales son denominados como espacio *a* y espacio *b* (ver Anexo 6).
- Grúa RTG: es la encargada de tomar el contenedor desde los espacios *a* o *b* junto a la zona de descarga o de almacenamiento y ubicarlo en la posición deseada, o viceversa, tomarlo de la posición en la que está almacenado y ubicarlo en estos espacios.
- Grúa Stacker: tiene la capacidad de trasladar el contenedor de la zona de descarga a la zona de almacenamiento.

GRÚA	CANTIDAD DE GRÚAS USADAS	MOVIMIENTO	VELOCIDAD
STACKER	1	Desplazamiento	250 m/min
RTG	2	Elevación	56 m/min
		Desplazamiento	130 m/min

Tabla 3. Tabla de velocidades

- Para esta investigación únicamente se trabajó con contenedores TEUS, es decir de 20 ft, y las medidas que se tomaron fueron las siguientes:

CONTENEDOR TEUS (20 ft)	MEDIDA EXTERNA
Ancho	2,43 m
Alto	2,59 m
Largo	6,05 m

Tabla 4. Medidas de contenedores

Es importante resaltar que existe una característica específica para cada puerto que depende de las propiedades de resistencia que tenga este, y es la capacidad con la que cuenta el piso para apilar contenedores (Giraldo, 2017). En este modelo se definió el nivel 1 como los contenedores que se encuentran sobre el piso.

- Número niveles: Cantidad de niveles que componen la matriz de almacenamiento.
- Número filas: Cantidad de fila que componen la matriz de almacenamiento.
- Número de columnas: Cantidad de columnas que compone la matriz de almacenamiento
- Número de contenedores: Cantidad de contenedores que van a ser manipulados
- Distancia entre zonas: Distancia entre la zona de descarga y la zona de almacenamiento.

En la tabla 5, se pueden observar los valores que se tomaron para cada lineamiento:

ESPECIFICACIONES	CANTIDAD
Niveles	3
Columnas	5
Filas	8
Contenedores	120
Distancia entre zonas	100 m

Tabla 5. Especificaciones

- La figura 3 representa una fila (i) cualquiera. La unión de varias filas idénticas es lo que define el tamaño de la matriz, es decir son varias filas pegadas una detrás de la otra. Las casillas azules representan los contenedores ubicados en el tercer nivel, las rosadas en el segundo y las verdes en el primer nivel. Se puede observar la numeración de derecha a izquierda, la cual representa el orden como se definieron las columnas en el modelo. Este orden es importante, pues, para facilidad y mejor manejo se estableció lo siguiente:
  - Si el contenedor se encuentra ubicado en la columna 1 o 2 deberá ser tomado por la grúa RTG y ser descargado en el espacio *a* que será en donde la grúa stacker lo tomará.
  - Si el contenedor se encuentra ubicado en la columna 3, 4 o 5 deberá ser tomado por la grúa RTG y ser descargado en el espacio *b*.

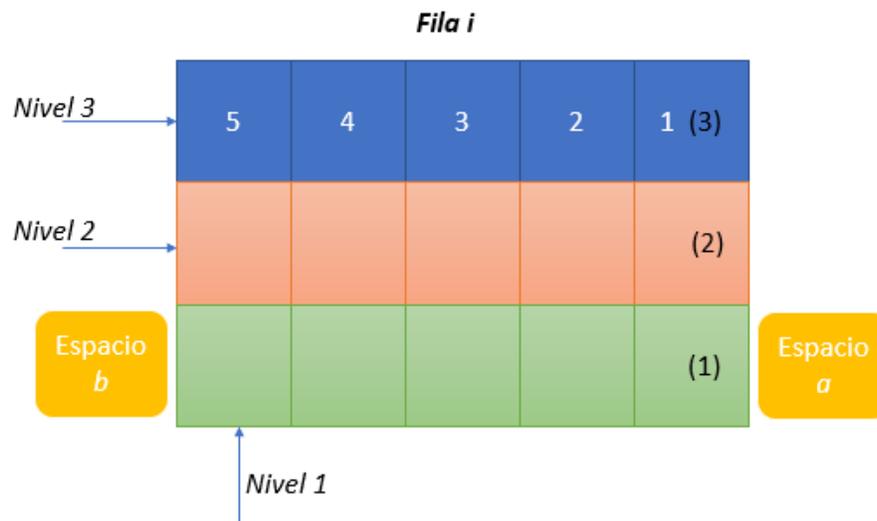


Figura 3. Ubicación contenedores

- La zona de descarga representa un parámetro con una lista aleatoria, la cual determina las ubicaciones de los contenedores en esta zona.

A partir de este escenario planteado, se simuló el escenario LIFO, el cual arrojó un resultado de 350,51 minutos. Este fue el resultado que se tomó como referencia para medir el impacto de las mejoras propuestas. Además, para obtener un resultado más aproximado a la realidad, se tuvieron en cuenta las siguientes variables:

- Una de las variables que más afecta la movilización en puertos es el tipo de grúa que se usa en este. Con grúas más nuevas, más grandes y mejor equipadas es más fácil operar en un puerto. Por esto se decidió usar una grúa RTG para llevar a cabo el desarrollo del sistema propuesto, a pesar de que el costo de esta grúa es representativo, se pueden obtener mejores resultados en las actividades logísticas, ya que es un recurso que facilita los procesos que se realizan dentro de estas (Doerr & Sánchez, 2006).
- Las operaciones de descargue y despacho de contenedores es otra de las variables que pueden generar congestión si no se realizan de una manera adecuada, es decir no aprovechando las ventajas de los sistemas (Doerr & Sánchez, 2006). Por esta razón para este modelo, el proceso de descarga se realiza de la manera más ágil sin tener en cuenta un orden. En cuanto al proceso de despacho, se definieron citas aleatorias para que cada camión cumpla con ellas al momento de recoger un contenedor y así disminuir las congestiones que se puedan ocasionar en el puerto.
- El tiempo que tardan los camiones en el puerto está ligado a las largas colas que deben hacer para ingresar a este, siendo esto una posible causa de las congestiones que se generan dentro del mismo y afectando de esta manera las operaciones conjuntas que se llevan a cabo (Doerr & Sánchez, 2006). Por tal motivo esta investigación, buscando reducir estos tiempos, planteó además de las citas descritas anteriormente, la existencia de un espacio en la zona de almacenamiento donde el camión podrá ingresar a este lugar y ser cargado directamente por la grúa RTG buscando reducir el tiempo de proceso y las filas que se puedan generar en el ingreso del puerto.
- La altura del apilamiento es otra variable que determina que tan rápido va ser el proceso de despacho de un contenedor, mediante este modelo se busca reducir este tiempo, que en la literatura se conoce como tiempo de configuración (Kozan & Preston, 2006).

#### 4.3. Analizar

Buscando mejorar el tiempo total del sistema, se planteó como solución inicial el traslado de contenedores de la zona de descargue a la zona de almacenamiento, la cual propone el siguiente orden:

- a. El primer contenedor que se desplazará hacia la zona de almacenamiento es el contenedor ubicado en la posición 1,1,3, esto quiere decir el contenedor ubicado en la fila 1, columna 1 y nivel 3. Para tener una mejor idea se puede observar en la figura 4:

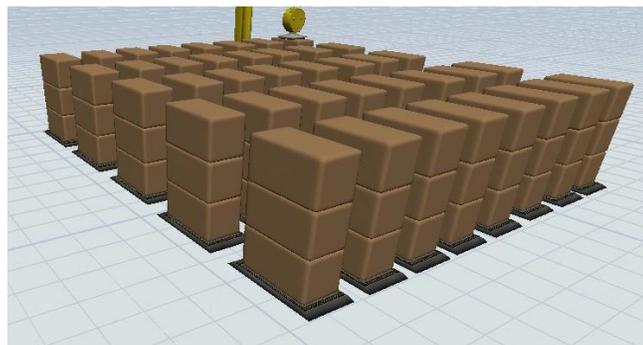


Figura 4. Contenedores en el sistema

- b. El segundo contenedor que será trasladado a la zona de almacenamiento es el contenedor ubicado en la posición 1,2,3. El cual se encuentra ubicado en la fila 1, columna 2 y nivel 3. Esto nos indica que el orden en el que se deben llevar los contenedores es primero las columnas, luego los niveles y por último las filas. Pues, primero se desocupa el nivel 3 de la fila 1 tomando los contenedores ubicados en las columnas 1, 2, 3, 4 y 5 (siguiendo el respectivo orden) del nivel 3 de la fila en cuestión.

- c. Para trasladar los contenedores hasta la zona de almacenamiento, se usa la grúa RTG, la cual es la encargada de tomar el contenedor que se requiera, removerlo de su posición y finalmente ubicarlo en el espacio a o b, dependiendo de la columna en la que se encuentre, según la regla que se definió anteriormente.
- d. Una vez el contenedor se encuentra ubicado en el espacio a o b, la grúa stacker, la cual es la que permite desplazarse por todo el puerto, toma el contenedor que requiere ser trasladado hasta la zona de almacenamiento y lo ubica en los espacios designados en esta zona.
- e. Cuando el contenedor ya se encuentra en los espacios a o b de la zona de almacenamiento, dicha zona también cuenta con una grúa RTG que será la encargada de tomar el contenedor del espacio donde lo ubicó la grúa stacker y posicionarlo en su lugar de almacenamiento.
- f. Se estableció un orden para llenar la zona de almacenamiento, ya que los problemas se incrementan una vez los contenedores se encuentran apilados, debido a que la búsqueda de estos se vuelve más compleja. El orden que se definió fue realizar el llenado de las posiciones existentes en el nivel 1, y una vez el nivel 1 se encuentre ocupado se procede a llenar el nivel 2, finalizando con el nivel 3.

La solución inicial es la base para el diseño de la función objetivo, la cual busca minimizar el tiempo total de manipulación del contenedor. Este tiempo depende de la distancia recorrida desde el momento que se descarga hasta que es ubicado en la zona de almacenamiento y a su vez de la velocidad de la grúa que lo esté manipulando. La siguiente fórmula fue utilizada para calcular la función objetivo:

$$F. O. = \frac{\text{Distancia Horizontal}}{\text{Velocidad de Desplazamiento grúa RTG}} + \frac{\text{Distancia Vertical}}{\text{Velocidad de Elevación grúa RTG}} + \frac{\text{Distancia de Llevarlo a la zona}}{\text{Velocidad de Desplazamiento grúa stacker}}$$

Para poder llevar a cabo el modelo, se definieron tres tipos de distancias y para cada una de ellas una fórmula específica:

- I. *Distancia Horizontal*: es la distancia recorrida por la grúa RTG para mover el contenedor de su posición inicial a su posición final, dentro de cada zona (zona de descarga o almacenamiento), sin tener en cuenta los movimientos verticales que se requieren para mover el contenedor de su posición. Es decir, es la suma de columnas que se debe desplazar la grúa RTG hasta ubicar el contenedor en donde la grúa stacker lo pueda tomar, multiplicado por la medida del ancho de un contenedor. Esto está ligado a la regla definida del orden de las columnas, para saber cuál es la menor cantidad de columnas que deberá desplazarse la grúa RTG.
- II. *Distancia Vertical*: es la distancia que debe recorrer la grúa RTG para mover el contenedor entre niveles hasta el espacio establecido junto a cada zona. Únicamente tiene en cuenta los movimientos verticales, es decir, si se requiere mover un contenedor ubicado en el nivel 1, el cual tiene dos contenedores encima, deberá ser la suma de tomar el contenedor ubicado en el nivel 3, elevarlo el doble de la medida del alto de un contenedor para evitar chocar con otro contenedor que este ubicado en el nivel 3. Se debe desplazar la distancia horizontal calculada, y descargar el contenedor. Para descargarlo deberá recorrer 4 veces la medida del alto de un contenedor teniendo en cuenta que el espacio a o b a usarse estará vacío en dicho momento. La grúa deberá volver a subir estos 4 movimientos, y desplazarse a la columna donde se encuentra el contenedor que se requiere mover. Antes de tomar el contenedor ubicado en el nivel 1, debe remover el contenedor ubicado en el nivel 2. Para esto deberá realizar el mismo procedimiento que realizó con el contenedor ubicado en el nivel 3. Es decir, elevar el contenedor tres veces la medida del alto de un contenedor, desplazarse la distancia horizontal calculada y bajar 3 veces el alto de un contenedor. Descargarlo sobre el contenedor ya ubicado en este espacio en el procedimiento anterior. La grúa deberá volver a subir tres veces la medida del alto de un contenedor y desplazarse a la columna donde se encuentra el contenedor que se requiere llevar a la zona de almacenamiento. Bajar 4 veces la medida del alto de un contenedor, tomar el mismo y ubicarlo encima de los contenedores descargados en los dos procedimientos anteriores, donde finalmente la grúa stacker lo tomará. Para tener una mejor idea se puede observar en el siguiente gráfico:

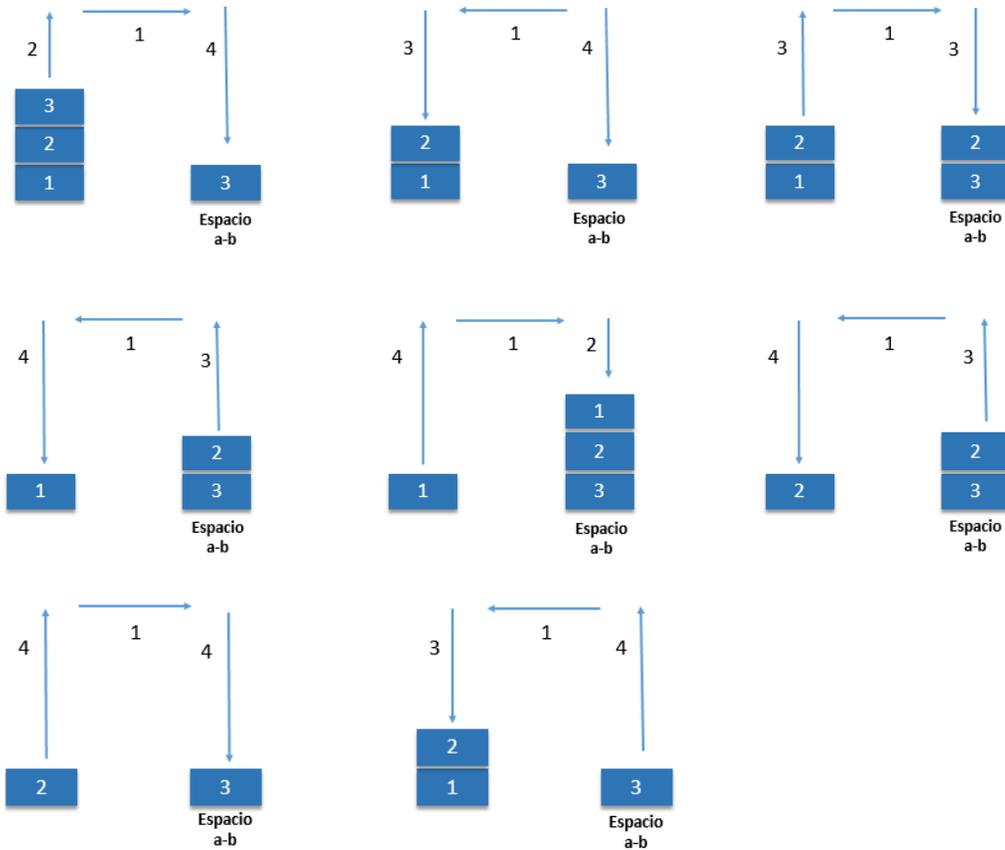


Figura 5. Movimiento de contenedores

- III. *Distancia de trasladarlo a la Zona de Almacenamiento:* para este modelo se determinó que la distancia entre la zona de descarga y la zona de almacenamiento es de 100 m. Es decir, la distancia de llevarlo a la zona de almacenamiento es sumar la cantidad de filas (mismo número a la fila donde se encuentra ubicado el contenedor) que debe recorrer la grúa para salir de la zona de descarga. Si el contenedor se ubica en la fila 5, deberá recorrer 5 veces la medida del largo de un contenedor hasta llegar al punto más cercano a la zona de almacenamiento dentro de la zona de descarga. En este punto la grúa stacker lo toma, y se suma la distancia que hay entre zonas. Una vez llega a la zona de almacenamiento, se debe sumar adicionalmente el número de filas que deberá recorrer la grúa RTG para ubicar el contenedor en la fila a la cual va dirigido.

Se definieron las siguientes fórmulas para calcular la fila, columna y nivel a donde llega el contenedor que se está trasladando:

*Fila de llegada:* Fila en la zona de almacenamiento a la cual llega el contenedor para ser almacenado, donde:

$$\lceil \frac{a - \lfloor \left( \frac{a}{\text{Numero de Columnas} * \text{Numeros de filas}} \right) * (\text{Numeros de columnas} * \text{Numero de filas})}{\text{Numero de columnas}} \rceil$$

*Columna de llegada:* Columna en la zona de almacenamiento a la cual llega el contenedor para ser almacenado, donde:

$$a - \lfloor \left( \frac{a}{\text{Numero de columnas}} \right) * (\text{Numero de columnas})$$

*Nivel de llegada:* Nivel en la zona de almacenamiento al cual llega el contenedor para ser almacenado, donde:

$$\uparrow \left( \frac{a}{\text{Numero de filas} * \text{Numero de columnas}} \right)$$

Los siguientes lineamientos fueron tenidos en cuenta para el diseño de la función objetivo:

**Parámetros:**

*Orden zona de descarga:* Matriz de números aleatorios, del tamaño de contenedores definidos para el modelo, la cual representa la zona de descarga.

*Orden de salida del puerto:* Matriz de números aleatorios, del tamaño de contenedores definidos para el modelo, la cual representa el orden de la cita de entrega de los contenedores.

*Fila i:* Es la fila de la zona de descarga, donde se encuentra ubicado el contenedor que será trasladado a la zona de almacenamiento.

*Columna j:* Es la columna de la zona de descarga donde se encuentra ubicado el contenedor que será trasladado a la zona de almacenamiento.

*Nivel k:* Es el nivel de la zona de descarga, donde ese encuentra ubicado el contenedor que será trasladado a la zona de almacenamiento.

**Variables:**

*Orden de salida zona de descarga:* Matriz que representa el orden en que los contenedores van a ser trasladados de la zona de descarga a la zona de almacenamiento.

A partir de la solución inicial planteada y una vez definida las distancias verticales, horizontales y la distancia de trasladar el contenedor a la zona de almacenamiento, se calculó la función objetivo diseñada para esta solución donde se obtuvo como resultado un tiempo total de 272,55 minutos.

#### **4.4. Diseñar**

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la solución inicial, se tomó la decisión de realizar una metaheurística para evaluar su resultado y determinar si es posible mejorar el tiempo total. Adicionalmente, para evaluar el rendimiento de la metaheurística diseñada, se comparará con los resultados obtenidos por una segunda metaheurística creada. Como primera metaheurística se realizará una Búsqueda Tabú la cual será comparada con un Algoritmo Genético.

##### **4.4.1. Búsqueda Tabú**

Fred Glover a principios de los años 70, planteo un procedimiento Heurístico llamado Búsqueda tabú. Es un método que permite cruzar cotas de optimalidad local las cuales son tratadas como barreras y así poder eliminar cotas sistemáticas para que se pueda explorar regiones que no se consideraban en otros casos. La filosofía de búsqueda Tabú es derivar y explotar una colección de estrategias inteligentes para la resolución de problemas, basadas en procedimientos implícitos y explícitos de aprendizaje (Glover & Melián, 2003).

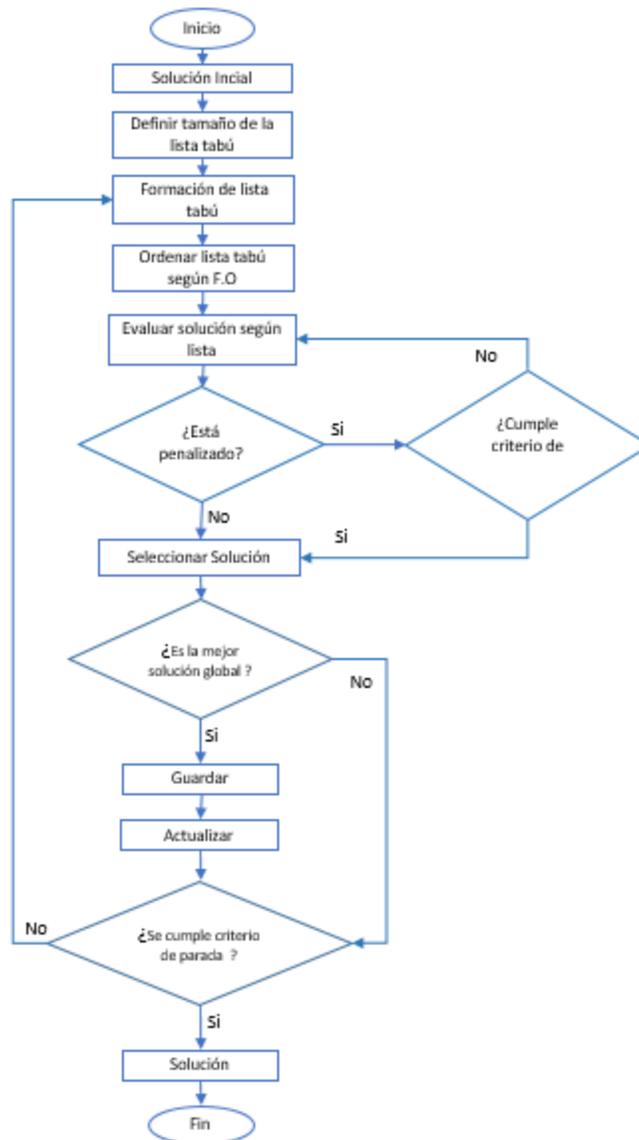


Figura 6. Diagrama de flujo búsqueda tabú

Con el uso de la metaheurística Búsqueda Tabú se espera encontrar una mejor solución dada una solución inicial que representa el orden de la salida de los contenedores de la zona de descarga hacia la zona de almacenamiento.

El objetivo de la Búsqueda Tabú es realizar cambios entre la solución inicial, intercambiando el orden de los contenedores y cada que se realice un cambio se calcula la función objetivo con el fin de conocer si esta mejora o no.

A medida que se están realizando los diferentes cambios, puede que la metaheurística encuentre una muy buena función objetivo y se quede repitiendo este cambio indefinidamente, para esto se creó una penalización la cual indica que cada vez que encuentre una buena función objetivo no podrá volver a realizar este intercambio en el orden los contenedores por cierta cantidad definida, que para el modelo fueron tres iteraciones.

Se estableció también un máximo de iteraciones en el cual el modelo se detendrá si no mejora el valor de su función objetivo. Este criterio de parada se estableció dado que a partir de la 9 iteración la función objetivo empieza a estabilizarse, teniendo en cuenta que, al escogerse un menor valor como criterio de parada, el algoritmo no podrá evaluar otras opciones.

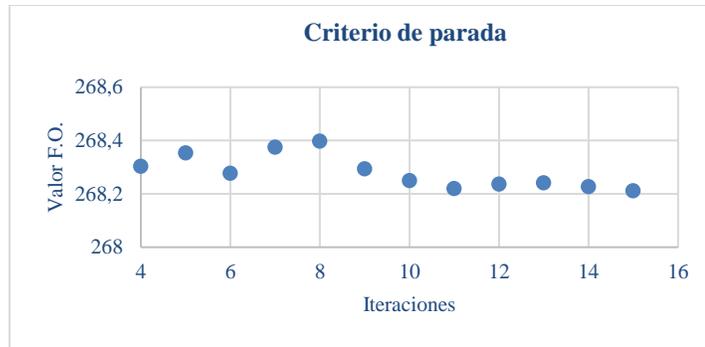


Figura 7. Criterio de parada

Luego de ejecutar repetidamente el algoritmo y notar que a partir de 1000 iteraciones el resultado empieza a estancarse, se definió este valor como *el tamaño de la Lista Tabú*. Esto se puede observar en la figura 7:

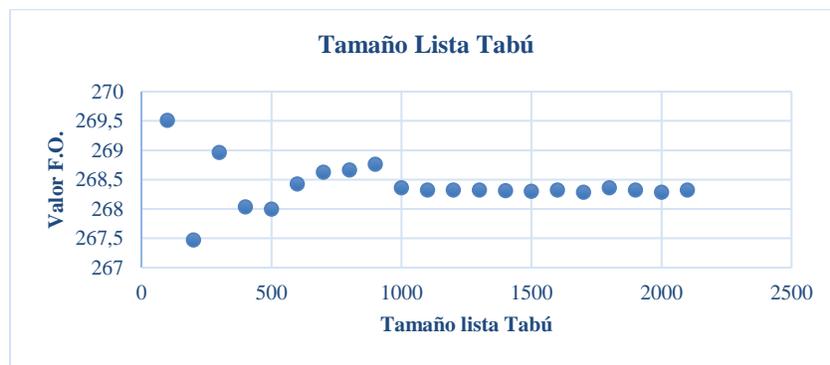


Figura 8. Iteración lista tabú

A medida que se vayan ejecutando las iteraciones, Búsqueda Tabú irá comparando cada resultado que se arroje con el resultado de la función objetivo inicial y si es mejor irá guardando este resultado como la mejor función objetivo. Adicionalmente, se agregó el criterio de aspiración el cual hace referencia a que a medida que se están realizando los cambios, si se encuentra un cambio el cual está penalizado pero la función objetivo es mejor a la mejor función objetivo, guardada por la metaheurística hasta el momento, permitirá tomar el valor de la función objetivo que arroja el cambio que se está realizando así este se encuentre penalizado.

Para esta metaheurística se usaron los siguientes lineamientos, además de los parámetros ya descritos en la solución inicial:

**Parámetros:**

*Mejor Solución:* Guarda la mejor solución obtenida por la metaheurística hasta el momento.

*Mejor Función Objetivo:* Guarda la mejor función objetivo a partir de la mejor solución obtenida por la metaheurística.

Matriz que representa el orden en que los contenedores van a ser trasladados de la zona de descarga a la zona de almacenamiento.

*Función Objetivo Inicial:* Guarda el valor obtenido por la solución inicial.

*Iteraciones penalización:* Son las iteraciones que estará penalizado un intercambio una vez el algoritmo encuentre una buena función objetivo.

*Máximo de iteraciones:* Cantidad de iteraciones definidas donde el algoritmo se detendrá mientras la función objetivo no mejore.

<b>LINEAMIENTO</b>	<b>VALOR</b>
Tamaño lista Tabú	1000 iteraciones
Iteraciones Penalización	3 iteraciones
Máximo de iteraciones	10 iteraciones

*Tabla 6. Lineamientos búsqueda tabú*

**Variables:**

*Matriz de penalización:* Matriz que indica el cambio que se encuentra penalizado.

*Tabús:* Es una estructura que guarda, para cada intercambio que se realice, los siguientes datos:

- Posición 1: El primer contenedor que va a ser intercambiado.
- Posición 2: El segundo contenedor que va a ser intercambiado.
- Contenedores: Matriz que indica el orden según el intercambio de contenedores realizado.
- FO: Función objetivo calculada para cada iteración.
- Penalización: Indica si el intercambio está penalizado o no.

*Lista Tabú:* Es una variable de tipo Tabús que indica que intercambio se está realizando con los respectivos datos que guarda dicha estructura.

Una vez se obtiene el resultado arrojado por la metaheurística Búsqueda Tabú, se procede a comparar su rendimiento con la aplicación del Algoritmo Genético.

#### **4.4.2. Algoritmo Genético.**

La técnica metaheurística de los algoritmos genéticos fue ideada por Holland en 1975 y está inspirada en los procesos de adaptación de los seres vivos (Sánchez, 2007). Los algoritmos genéticos son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. Están basados en el proceso genético de los organismos vivos. Por imitación de este proceso, los algoritmos genéticos son capaces de ir creando soluciones para problemas del mundo real (Moujahid, Inza, & Larrañaga).

El poder de los algoritmos genéticos proviene del hecho de que se trata de una técnica robusta y pueden tratar con éxito una gran variedad de problemas provenientes de diferentes áreas incluyendo aquellos en los que otros métodos encuentran dificultades. Si bien no se garantiza encuentre la solución óptima del problema, existe evidencia empírica de que se encuentran soluciones de nivel aceptable (Sánchez, 2007).

El siguiente gráfico representa el orden en el cual se desarrolló la metaheurística:

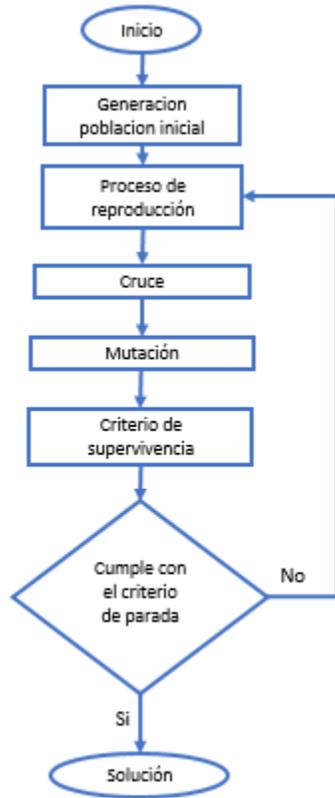


Figura 9. Diagrama de flujo algoritmo genético

Inicialmente se parte de un conjunto de padres que representan el orden de salida zona de descarga, los cuales se manipulan para obtener/generar poblaciones sucesivas. En primera instancia, éstos se generan a partir de una solución con números aleatorios impidiendo que los contenedores (padres) se repitan.

El método de cruce utilizado fue el cruce intermedio por punto aleatorio, en el cual se define un punto de corte en los cromosomas, es decir, el primer hijo se constituye de los genes de la primera parte del padre uno y se completa con los restos del padre dos, mientras que, el segundo hijo es conformado por los genes de la primera parte del padre dos y se completa con los restos del primer padre. En la figura 10 se puede observar el método de cruce:

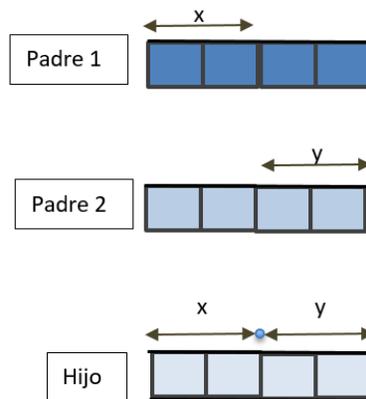


Figura 10. Algoritmo genético

Es importante resaltar que en cada iteración se verificó que no se repitieran los contenedores (control de calidad/inspección). Se estableció una mutación del 10% en la cual se eligen e intercambian dos contenedores aleatorios entre ellos sin importar el impacto sobre la solución, esta mutación se definió debido a que en algún punto

los valores obtenidos en las iteraciones se vuelven constantes y con la aplicación de este porcentaje es posible obtener nuevas soluciones que el algoritmo evaluara sin son factibles. Además, se destaca que la aplicación de los cruces y las mutaciones permite obtener, típicamente, soluciones con mejores funciones de adaptación (Sánchez, 2007).

Luego, se realizó el criterio de supervivencia en el cual se ordenó la lista de hijos y padres de mejor solución a peor solución en el mismo arreglo. Seguido de esto se seleccionaron las 10 mejores soluciones eliminando los 10 peores resultados. El algoritmo finaliza si durante 10 iteraciones no mejora la función objetivo calculada. La última solución generada contiene la mejor población de acuerdo con el criterio de supervivencia mencionado anteriormente.

Para esta metaheurística se usaron los siguientes lineamientos, además de los parámetros ya descritos en la solución inicial:

**Parámetros:**

- Población inicial:* Matriz que representa el orden en que los contenedores van a ser trasladados de la zona de descarga a la zona de almacenamiento.
- Número de padres:* Número aleatorio para determinar el número de padres del modelo.
- Probabilidad de mutación:* Porcentaje de probabilidad de mutación definido para el modelo.
- Iteraciones sin mejora:* Cantidad de iteraciones definidas donde el algoritmo se detendrá mientras la función objetivo no mejore.

LINEAMIENTO	VALOR
Número de Padres	50
Probabilidad de mutación	10%
Iteraciones sin mejora	10 iteraciones

*Tabla 7. Lineamientos algoritmo genético*

**Variables:**

- Padres** Es una estructura que guarda, para cada iteración que se realice, los siguientes datos:
  - Orden contenedores: Matriz que indica el orden de los contenedores según las iteraciones que se esté realizado.
  - FO: Función objetivo calculada para cada iteración.
- Padre:** Es una variable de tipo Padres que indica que iteración se está realizando con los respectivos datos que guarda dicha estructura.

Una vez se han comparado los resultados obtenidos por las dos metaheurísticas aplicadas, se procede a diseñar el modelo de simulación.

**4.4.3. Modelo de simulación**

Se diseñó un modelo de simulación para entender el comportamiento del sistema y así mismo poder evaluar el desempeño de los algoritmos. Para la simulación se definieron dos horas de llegada del buque, a las 10:00 am y a las 4:00 pm, basándose en el puerto de Buenaventura, Colombia el cual cuenta con determinados cortes de llegada (Buenaventura, 2016). En estas horas definidas, se descargarán 120 contenedores en cada atraque, los cuales serán ubicados en la zona de descarga. Para llevar a cabo esto, se insertó una tabla global con números aleatorios, dichos números fueron arrojados por los resultados obtenidos en las metaheurísticas.

Una vez está llena la zona de descarga se utilizará la mejor solución arrojada por las metaheurísticas, esto con el fin de escoger el orden en el cual serán trasladados los contenedores a la zona de almacenamiento y así lograr ubicarlos de la mejor forma para que el camión los pueda recoger en el menor tiempo.

En el modelo se puede visualizar que la grúa RTG lleva los contenedores de la ubicación en la que se encuentra a uno de los dos espacios *a* o *b* seleccionados según los supuestos explicados. Posteriormente, la grúa stacker traslada los contenedores a los espacios de la zona de almacenamiento, donde la grúa RTG los toma y los ubica en la posición asignada teniendo en cuenta que en primera instancia llenara el nivel 1, después el nivel 2 y finalmente el nivel 3, siguiendo el mismo modelo propuesto en las metaheurísticas.

Por último, se obtuvo el orden de salida del puerto de los contenedores, por medio de las metaheurísticas diseñadas, el cual es representado por una lista de números aleatorios. Esta se incluyó mediante una tabla global en la simulación, lo cual representa la salida de los contenedores mostrando el momento en el que los camiones llegan a recogerlos.

En la figura 11 se puede observar el modelo diseñado:

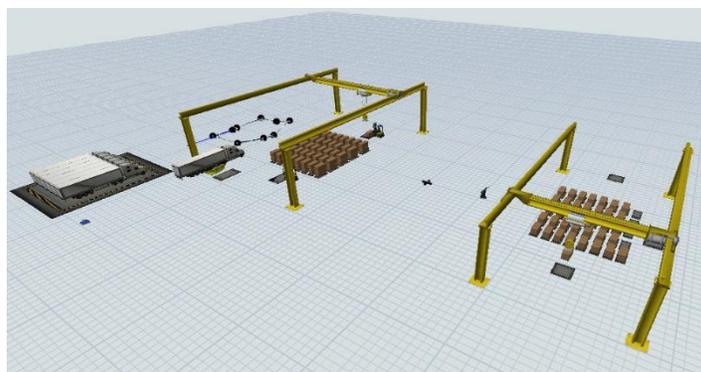


Figura 11. Modelo de simulación

Una vez simulados los resultados obtenidos por las metaheurísticas y analizado el comportamiento del sistema, se probaron diferentes escenarios para ver como impactaba el resultado con la adición de grúas stacker.

- El primer escenario que se probó fue el escenario actual para comparar el valor obtenido por los otros escenarios simulados.
- El segundo escenario mide el impacto en el tiempo adicionando una grúa stacker, para un total de dos de estas grúas, mejorando el tiempo en un 15,56%
- El tercer escenario, mejora el tiempo en un 27,73% el escenario actual, con un total de tres grúas stacker.
- El cuarto escenario, con un total de 4 grúas, mejora el tiempo actual en un 33,95%.

Se puede observar en la figura 12 que los demás escenarios probados no tienen un gran impacto en la capacidad instalada del puerto respecto al transporte de la zona de descarga a la zona de almacenamiento, por lo que no es funcional agregar más grúas.

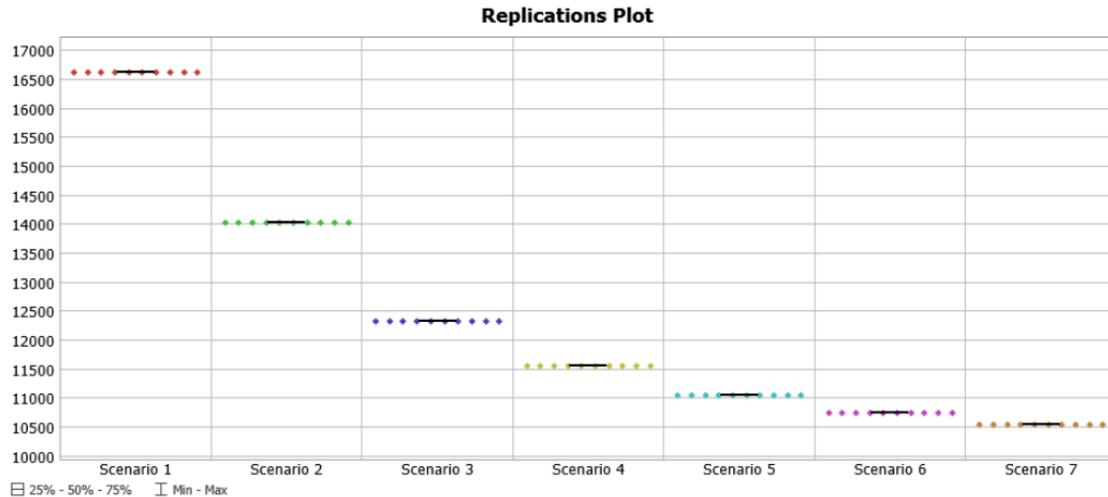


Figura 12. Escenarios

Gracias a este modelo de simulación diseñado, se abre la posibilidad de tomar decisiones logísticas y evaluar las mismas en un marco real y dinámico, con el objetivo de modificar lineamientos adicionales a las metaheurísticas usadas para la solución del problema en una instancia aproximada a la realidad (Legato, Mazza, & Triunfo, 2010).

#### 4.5. Verificar

Una vez aplicadas las mejoras planteadas, se puede observar que se cumplieron los objetivos propuestos ya que es posible evidenciar una mejora en el método que se realiza actualmente en los puertos (método LIFO).

Se puede concluir que se tomó el resultado que arrojó la metaheurística Búsqueda Tabú como la mejor solución a la que se pudo llegar en el alcance de esta investigación, debido a que mejora considerablemente el tiempo total de traslado de los contenedores de la zona de descarga a la zona de almacenamiento en un puerto marítimo.

Todas las mejores que se proponen en este documento son flexibles, ya que aceptan la modificación de parámetros de entrada, permitiendo que el resultado se adapte a las especificaciones que desee el usuario.

### 5. Componente de Diseño en ingeniería.

#### 5.1. Declaración de Diseño:

Diseñar una metaheurística para determinar la asignación adecuada de contenedores y manejo de equipos en un puerto marítimo, con el fin de reducir los tiempos muertos que estos generan.

#### 5.2. Proceso de Diseño:

“El proceso de diseño es el proceso de aplicar las diversas técnicas y principios científicos con el propósito de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficientes detalles que permitan su realización” (Norton, 2009).

El proceso de diseño de las metaheurísticas fue basado en la norma ISO 9126, en la figura 8 se logra evidenciar el proceso seguido en la investigación de inicio a fin.

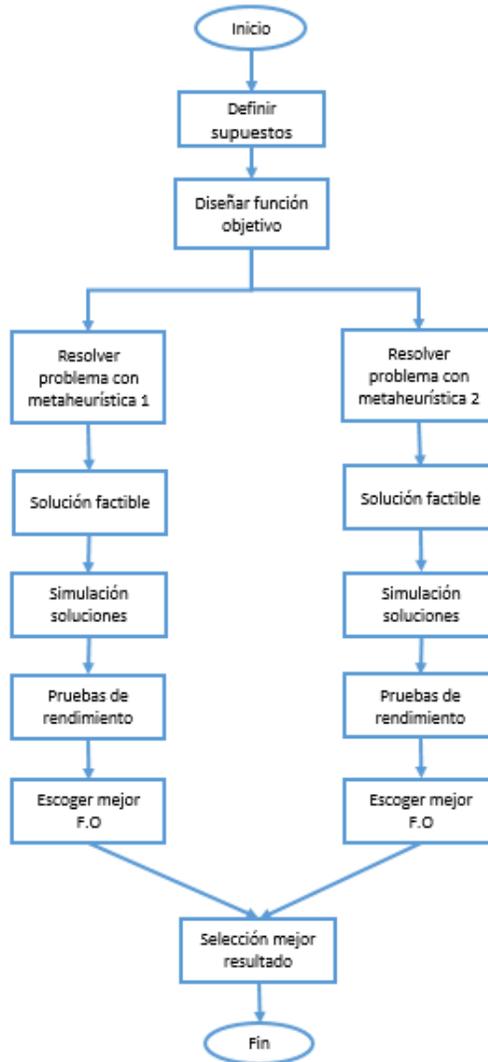


Figura 13. Diagrama de flujo proceso de diseño

Inicialmente se definieron supuestos específicos para llevar a cabo la secuenciación de contenedores, buscando generar un estándar en los movimientos de estos mismos. Enseguida se definió la función objetivo con el fin de determinar la estrategia adecuada de almacenamiento y cumplir con los objetivos propuestos. Por lo tanto, se diseñaron dos metaheurística- Búsqueda Tabú y Algoritmo Genético- con el fin de encontrar una solución factible para cada una de ellas, ambas soluciones se simularon para comprender el comportamiento del sistema y evaluar el desempeño de estas metaheurística. Seguido de esto se realizaron las pruebas de rendimiento con el fin de garantizar el cumplimiento de los requerimientos de desempeño ejecutando repetidamente dichas metaheurística con el propósito de escoger la mejor función objetivo. Finalmente se seleccionó el mejor resultado con el propósito de disminuir el tiempo de traslado de contenedores dentro de un puerto marítimo.

### 5.3. Requerimientos de desempeño:

Modelo de optimización deberá:

- Facilitar al puerto la ubicación y transferencia de contenedores desde el momento que se encuentra en la zona de descarga hasta la zona de almacenamiento, para que este sea entregado al cliente en el menor tiempo.

Modelo de simulación deberá:

- Representar la estructura física de un puerto.
- Mostrar visualmente los resultados obtenidos a partir de modelo de optimización.

### 5.4. Pruebas de rendimiento:

Para determinar el tamaño de la muestra se tomó como referencia el teorema del límite central. Este teorema reside en el hecho de que a medida que el tamaño de muestra se hace más grande la variable aleatoria tiende a convertirse en una variable aleatoria normal estándar, sin tener en cuenta la función de probabilidad asociada a la misma (Alvarado & Araújo, 2008).

Esto con el fin de garantizar el cumplimiento de los requerimientos de desempeño para ambas metaheurísticas (Ver anexo 7), donde:

- El tiempo de ejecución promedio fue de 5:24 minutos para Búsqueda Tabú y de 1:31 minutos para Algoritmo Genético.
- El mejor tiempo de ejecución entre ambas metaheurísticas fue de 0:56 minutos para el Algoritmo Genético.
- No se obtuvo ningún tipo de error o falla en cuanto a funcionalidad.
- El desempeño fue el esperado el 100% de las veces, desarrollando las tareas requeridas.

### 5.5. Restricciones:

Los tiempos de operación de las actividades para los diferentes equipos de un puerto, serán los reportados en la literatura.

Se establecieron supuestos para poder llevar a cabo la solución planteada los cuales fueron descritos anteriormente en la metodología.

### 5.6. Cumplimiento del estándar:

En la tabla 9, se presenta la norma ISO 9126 como estándar para la creación y desarrollo del aplicativo, donde se presentan las características requeridas por la norma y se explica el cumplimiento de cada una de estas.

CARACTERÍSTICAS	APLICACIÓN
Funcionalidad	El modelo asigna los contenedores desde que están en la zona de descarga para ser ubicados en la zona de almacenamiento.
Funcionalidad	Las metaheurísticas permiten tener un número ilimitado de ejecuciones.
Confiabilidad	El modelo es capaz de mantener los requerimientos del sistema duramente un tiempo establecido y bajo un conjunto de condiciones definidas.

Usabilidad	La metaheurística permite al usuario operar y usar de forma fácil este algoritmo para así mismo entender sus resultados.
------------	--

Tabla 8. Características norma ISO 9126

Para el desarrollo de este modelo se tuvo en cuenta el cumplimiento estándar el cual fue clasificado en dos parámetros:

- El tiempo de ejecución: El tiempo de las metaheurísticas está relacionado con el tipo de procesador donde se ejecuta el programa, para cumplir este estándar se realizaron 40 iteraciones en diferentes procesadores, donde se obtuvo un tiempo promedio de ejecución de 5: 24 minutos en búsqueda Tabú y 1:31 minutos para algoritmo genético.

Los tipos de procesadores en los cuales se ejecutaron las metaheurísticas fueron:

<b>PROCESADOR</b>	Intel(R) Core (TM) i5 2.20GHz	Intel(R) Core (TM) i5 2.40GHz	Intel(R) Core(TM) i3 1.70GHz	Intel(R) Core (TM) i3 1.70GHz
<b>MEMORIA INSTALADA (RAM)</b>	6,00 GB	3,00 GB	4,00 GB	4,00 GB

Tabla 9. Tipos de procesador

- Calidad – Precisión: Para cumplir con este ítem se diseñaron dos tipos de metaheurísticas como fueron búsqueda Tabú y Algoritmo Genético con el fin de observar su comportamiento (Ver anexo 8). Adicional, se compararon las funciones objetivo de estos modelos para determinar la mejor solución.

## 6. Resultados

En la actualidad en un puerto marítimo, generalmente para el traslado de los contenedores de la zona de descarga a la zona de almacenamiento, se emplea el orden de salida LIFO. Mediante el modelo de simulación diseñado, se representó el escenario LIFO, donde se obtuvo un tiempo total del sistema de 350,51 minutos. Seguido de esto, se comparó el resultado mencionado anteriormente, con el tiempo total que arroja la solución inicial ejecutada en el modelo matemático, la cual es de 272,55 minutos, para determinar si existe una mejora con la solución propuesta.

$$\% \text{ Mejora} = \frac{(LIFO - \text{Solución Inicial})}{LIFO} * 100\%$$

El porcentaje de mejora indica que la solución inicial frente al método LIFO reduce el tiempo total del sistema en un 22.24%. Por esta razón, se tomó la solución inicial propuesta como la primera iteración para realizar las dos metaheurísticas diseñadas.

A partir del análisis estadístico desarrollado para cada metaheurística, se seleccionó la mejor función objetivo, obteniendo como resultado para Búsqueda Tabú un tiempo total de 268,29 minutos y para el Algoritmo Genético un tiempo de 268,99 minutos. En la figura 14 y 15 se pueden observar los intervalos en los cuales varía el tiempo total del sistema para Búsqueda Tabú y Algoritmo Genético, respectivamente.

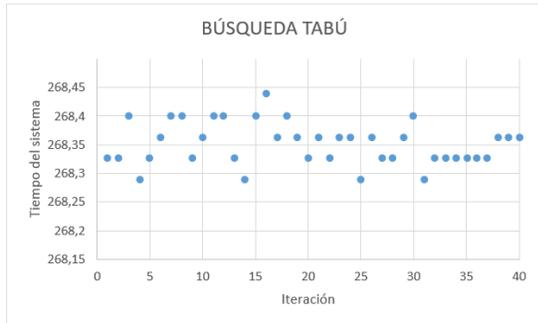


Figura 14. Tiempo en el sistema búsqueda tabú (VBA).

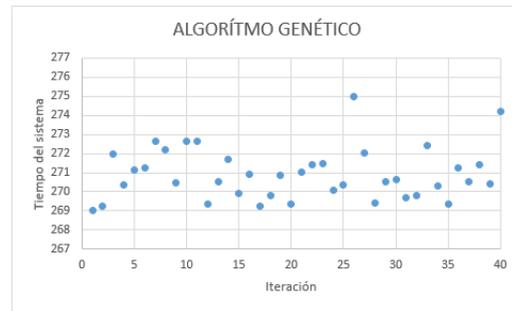


Figura 15. Tiempo en el sistema algoritmo genético (VBA).

Mediante el análisis estadístico, se calculó un promedio de los resultados obtenidos por cada metaheurística, con el fin de comparar cuál de estas arroja una mejor solución. Se evaluó el porcentaje de mejora, el cual indica que Búsqueda Tabú frente al Algoritmo Genético, reduce el tiempo de traslado de 120 contenedores a la zona de almacenamiento, en un 0,25%.

El modelo de simulación diseñado se utilizó para medir el desempeño de cada una de las metaheurísticas y comprender el comportamiento del sistema, en dicho modelo se realizaron 10 iteraciones con el fin de obtener un intervalo en el cual varía el tiempo total del sistema. En la figura 16 se puede observar que el intervalo de tiempo que el modelo demora en trasladar los contenedores a la zona de almacenamiento, en Búsqueda Tabú es (265,23 - 267,65) minutos y en la figura 17 este intervalo de tiempo es de (263,7-269,9) minutos para el Algoritmo Genético.

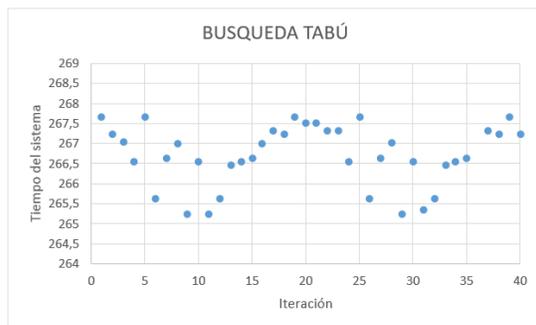


Figura 16. Tiempo en el sistema búsqueda tabú

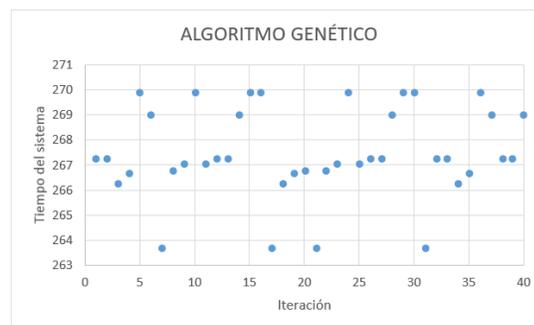


Figura 17. Tiempo en el sistema algoritmo genético

Los resultados muestran que cuando el modelo de simulación representa los escenarios propuestos por cada metaheurística, tiene mayor variación en el tiempo total del sistema que los resultados obtenidos una vez se ejecuta cada una de estas. Esta variación se debe a que el modelo de simulación es una representación más cercana al comportamiento que se está analizando, sin embargo, se logra concluir que los resultados para cada escenario tienen gran porcentaje de similitud y la tendencia es la misma arrojando una mejor solución la metaheurística Búsqueda Tabú.

	LIFO	TABU
<b>Tiempo Del Sistema</b>	350,51 min	268,29 min
<b>% De Mejora Contra Solución Inicial</b>	22,44%	1,56%

Tabla 10. Resumen resultados

## 7. Conclusiones y recomendaciones

La presente investigación propuso el diseño de dos metaheurísticas -Búsqueda tabú y Algoritmo genético- con el fin de obtener la asignación adecuada de contenedores y manejo de equipos dentro de un puerto marítimo.

La propuesta se formuló después de encontrar que el problema no ha sido ampliamente explorado en la literatura. Así mismo, algunos autores han demostrado que las metaheurísticas de Búsqueda Tabú y Algoritmo Genético son ideales para solucionar la estrategia de almacenamiento en los puertos marítimos (Kozan & Preston, 2006).

Las funciones objetivo de ambas metaheurísticas fueron comparadas y simuladas con el fin de comprender el comportamiento del sistema y evaluar su desempeño, seguido de esto se concluyó que la mejor función objetivo fue la de Búsqueda Tabú con un tiempo total de 268,29 minutos bajo los parámetros, supuestos planteados, restricciones y requisitos considerados mientras que para el Algoritmo Genético se obtuvo un tiempo de 268,99 minutos.

La metaheurística Búsqueda Tabú y Algoritmo Genético que se proponen en la investigación contienen valores cambiantes (aleatorios), lo cual indica que son metaheurísticas estocásticas (Murillo, 2000). Búsqueda Tabú garantiza que no visita un mismo vecindario más de una vez y dado que esta metaheurística encuentra una buena solución y busca como mejorarla en movimientos específicamente diseñados para este problema, genera que se obtengan mejores soluciones para este diseño, arrojando Búsqueda Tabú una mejora de 0,3% frente al Algoritmo Genético.

Luego de la ejecución y desarrollo del proyecto es posible concluir que el modelo de simulación diseñado reafirma en gran medida los resultados obtenidos por medio de las metaheurísticas diseñadas. Se recomienda en futuras investigaciones implementar diferentes parámetros o métodos dentro de los mismos algoritmos con el fin de determinar si estos pueden afectar su desempeño.

## 8. Glosario

- **Metaheurística:** “Los procedimientos Metaheurísticos son una clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas de difícil optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son efectivos” (Suárez, 2011)
- **Modelo matemático:** Proceso que utiliza conceptos y técnicas, esencialmente en matemáticas, para el análisis de situaciones reales (Bassanezi & Biembengut, Modelo matemática: Una antigua forma de investigación un nuevo método de enseñanza)
- **Secuenciación:** La secuenciación de operaciones hace parte del nivel de planificación a corto plazo y principalmente es una rama de la optimización combinatoria que ha desarrollado su propia metodología utilizando herramientas matemáticas y computacionales variadas; donde el objetivo es encontrar una secuencia óptima para la ejecución de unos trabajos y sus respectivas operaciones en las máquinas o recursos disponibles limitados, la optimalidad de la secuencia depende de la función objetivo. (Alberto, Rodriguez, & Londoño, 2008)
- **LIFO:** Ultimo en entrar primero en salir (Pacheco, 1995)

## 9. Tabla de Anexos o Apéndices

No. Anexo	Nombre	Desarrollo	Tipo de Archivo	Enlace corto ( <a href="https://goo.gl/">https://goo.gl/</a> )	Relevancia para el documento (1-5)
1	Equipos de manipulación y planta física de un puerto marítimo.	Propio	Word	<a href="https://drive.google.com/file/d/19qKZwxKeNQxDtbqq7N-yGNx3JhfkcYq/view?usp=sharing">https://drive.google.com/file/d/19qKZwxKeNQxDtbqq7N-yGNx3JhfkcYq/view?usp=sharing</a>	3
2	Búsqueda Tabú	Propio	Excel	<a href="https://drive.google.com/file/d/1F9I4cqvnEBNtq8">https://drive.google.com/file/d/1F9I4cqvnEBNtq8</a>	5

No. Anexo	Nombre	Desarrollo	Tipo de Archivo	Enlace corto ( <a href="https://goo.gl/">https://goo.gl/</a> )	Relevancia para el documento (1-5)
				PS4RQPgr3RPit71Oj6/v iew?usp=sharing	
3	Algoritmo Genético	Propio	Excel	<a href="https://drive.google.com/file/d/1vB7lpXplx9EwgHEU3hxsHaGvocmrMgM4/view?usp=sharing">https://drive.google.com/file/d/1vB7lpXplx9EwgHEU3hxsHaGvocmrMgM4/view?usp=sharing</a>	5
4	Modelo de simulación	Propio	FlexSim	<a href="https://drive.google.com/file/d/1codSU9miPZ4iif3SSSec7eLt4fpFEYpv/view?usp=sharing">https://drive.google.com/file/d/1codSU9miPZ4iif3SSSec7eLt4fpFEYpv/view?usp=sharing</a>	5
5	Costo promedio de descargar y mantener un buque en un Puerto Marítimo.	Propio	Word	<a href="https://drive.google.com/file/d/1npTIPfsPhvq0SL4FMZAVS0tWmRmtMx7Z/view?usp=sharing">https://drive.google.com/file/d/1npTIPfsPhvq0SL4FMZAVS0tWmRmtMx7Z/view?usp=sharing</a>	2
6	Estructura física de un puerto	Propio	Word	<a href="https://drive.google.com/file/d/129WytFTfgo33Wc-3Ao0BiY9x_ASHFnjj/view?usp=sharing">https://drive.google.com/file/d/129WytFTfgo33Wc-3Ao0BiY9x_ASHFnjj/view?usp=sharing</a>	4
7	Análisis estadístico del tiempo de ejecución para cada metaheurística	Propio	Excel	<a href="https://drive.google.com/file/d/1dVimFhw8ESumQOMaONjr8hZDvf_MuKV_/view?usp=sharing">https://drive.google.com/file/d/1dVimFhw8ESumQOMaONjr8hZDvf_MuKV_/view?usp=sharing</a>	2
8	Análisis estadístico del resultado de cada metaheurística	Propio	Word	<a href="https://drive.google.com/file/d/1kZv1nQyzo5arDjriLUZP-HMSb5aBLRnh/view?usp=sharing">https://drive.google.com/file/d/1kZv1nQyzo5arDjriLUZP-HMSb5aBLRnh/view?usp=sharing</a>	2

## Referencias

- Alberto, A., Rodríguez, E., & Londoño, M. (2008). *Secuenciación de operaciones para configuraciones de planta tipo flexible Job Shop: Estado del arte*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Alvarado, J. A., & Araújo, J. J. (2008). *Fundamentos de inferencia estadística*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- ANIF. (2013). *Contenedores y Comercio Exterior: El caso de Colombia*.
- ANIF. (2014). *Costos de transporte, multimodalismo y la competitividad en Colombia*. Bogotá.
- Bassanezi, R., & Biembengut, S. (Modelo matemática: Una antigua forma de investigación un nuevo método de enseñanza). 1997. *Revista de didáctica de las matemáticas*, 25.
- Batista, B. M. (s.f.). *Introducción a la Búsqueda Tabú*. San Cristóbal de la Laguna: Universidad de La Laguna.
- Bazzazi, M., Safaei, N., & Javadian, N. (2008). *A genetic algorithm to solve the storage space allocation problem in a container terminal*. Ontario: University of Science and Technology; University of Toronto,.

- Buenaventura, S. p. (2016). Obtenido de [http://www.sprbun.com/documents/20181/26784/Ventanas\\_ataque\\_2016.pdf/6c3a1f68-6ade-4a83-90f6-837f8118bd57](http://www.sprbun.com/documents/20181/26784/Ventanas_ataque_2016.pdf/6c3a1f68-6ade-4a83-90f6-837f8118bd57)
- Cañari, A. C. (2005). *Conceptos, algoritmo y aplicación al problema de las N – reinas*. Perú: UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS.
- Doerr, O., & Sánchez, R. (2006). *Indicadores de productividad para la industria portuaria. Aplicacion América Latina y el Caribe* . Santiago de Chile: CEPAL.
- Eliiyi, D., Özcam, B., Ada, E., Güldogan, E., Sevil, B., & Yumurtaca, I. (2008). *Simultaneous allocation of continuous berths and mobile cranes with variable handling times*. Neringa, Lithuania.
- Giraldo, J. E. (2017). *RESOLUCIÓN NÚMERO 0000850 DE 2017*. LEGIS.
- H. Petering, M. (2013). *Real-time container storage location assignment at an RTG-based seaport container transshipment terminal: problem description, control system, simulation model, and penalty scheme experimentation*. Wisconsin-Milwaukee: Springer.
- Informe Nacional de Competitividad. (2015). *Diseño Logístico: Infraestructura, Transporte y Logística*. Bogotá, Colombia: Consejo Privado de Competitividad.
- ISO. (09 de 2011). *International Organization for Standardization*. Obtenido de <https://www.iso.org/standard/52901.html>
- Jiang, X., Chew, E. P., Lee, L. H., & Tan, K. C. (2012). *Flexible space-sharing strategy for storage yard management in a transshipment hub port*. Singapore: National University of Singapore.
- Koster, Iris FA- Vis Renée . (2002). *Transshipment of containers at a container terminal: An overview*.
- Kozan, E., & Preston, P. (1999). *Genetic algorithms to schedule container transfers at multimodal terminals*. Brisbane, Australia: Pergamon.
- Kozan, E., & Preston, P. (2006). *Mathematical modelling of container transfers and storage locations at seaport terminals*. Brisbane, Australia: Springer-Verlag.
- Larrucea, J. R. (2009). *Cláusulas contractuales de carga y descarga 2009*. Barcelona: Universidad politecnica de Catalunya.
- Legato, P., Mazza, R. M., & Triunfo, R. (2010). *Simulation-based optimization for discharge/loading operations at a maritime container terminal*. Arcavacata: Università della Calabria.
- Moujahid, A., Inza, I., & Larrañaga, P. (s.f.). *Algoritmos Genéticos*. País Vasco: Universidad del País Vasco.
- Murillo, A. (2000). *APLICACION DE LA BUSQUEDA TABU EN LA CLASIFICACION POR PARTICIONES*. *Revistas Ciencias Matematicas*, 183-194.
- Pacheco, J. (1995). *Heuristico para los problemas de rutas con cargas y descargas en sistemas LIFO*.
- Petering, M. E. (2013). *Real-time container storage location assignment at an RTG-based seaport container transshipment terminal: problem description, control system, simulation model, and penalty scheme experimentation*. Wisconsin: University of Wisconsin-Milwaukee,.

- Preston, P., & Kozan, E. (1999). *An approach to determine storage locations of containers at seaport terminals*. Brisbane, Australia.: Pergamon.
- R.Tavakkoli-Moghaddam, A. S. (2008). An efficient algorithm for solving a new mathematical model for a quay crane.
- Rodrigue-Molins, M., Salido, M., & Barber, F. (2011). *Intelligent planning for allocating containers in maritime terminals*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Rodriguez-Molins, M., Salido, M., & Barber, F. (2011). *Intelligent planning for allocating containers in maritime terminals*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Saanan, Y. A., & Valkengoed, M. (2005). *Comparison of three automated stacking alternatives by means of simulation*. The Netherlands.
- Sánchez, Á. G. (2007). *Técnicas metaheurísticas*. Madrid: Universidad politécnica de Madrid.
- Sanchez, C. M. (2015). *Tasas y tarifas portuarias en los puertos de interés general español*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Suárez, O. d. (2011). *Una aproximación a las heurísticas y metahurísticas*. Bogota: Universidad antonio nariño.
- TecHelp. (29 de 04 de 2017). *Consultoría tecnológica TecHelp Ltda*. Obtenido de [http://www.techelp.cl/news/pruebas-de-rendimiento/?utm\\_source=copy&utm\\_medium=paste&utm\\_campaign=copypaste&utm\\_content=http%3A%2F%2Fwww.techelp.cl%2Fnews%2Fpruebas-de-rendimiento%2F](http://www.techelp.cl/news/pruebas-de-rendimiento/?utm_source=copy&utm_medium=paste&utm_campaign=copypaste&utm_content=http%3A%2F%2Fwww.techelp.cl%2Fnews%2Fpruebas-de-rendimiento%2F)
- World Bank. (28 de 06 de 2016). *Connecting to Compete 2016: Logística Comercial en la Economía Global*. Obtenido de <http://www.worldbank.org/en/news/feature/2016/06/28/connecting-to-competite-2016-trade-logistics-in-the-global-economy>
- Zhang, C., Liu, J., Wan, Y.-w., Murty, K. G., & Linn, R. J. (2002). *Storage space allocation in container terminals*. Hong Kong: Pergamon.