

Modelación de la capacidad actual de las Grúas RTG en una Terminal de Contenedores en Buenaventura usando teoría de líneas de espera

Presentado por:

Manuel Felipe Rincón Clavijo

Sara Sofía Velasco Dueñas

Director del Trabajo

Juan José Bravo Bastidas

Codirector del Trabajo

Alex David Pinzón Vivas

Escuela de Ingeniería Industrial, Universidad del Valle

Enero de 2023

Resumen

El transporte por vía marítima permite movilizar mayores volúmenes de mercancía de una terminal marítima a otra frente a distintos medios de transporte existentes. Dentro de las operaciones que deben llevarse a cabo en una terminal marítima se encuentran la recepción y entrega de contenedores desde una grúa a un camión o tren. Debido al incremento de mercancía a movilizar que puede generarse en una terminal, al elevado costo, disponibilidad limitada de la maquinaria, etc, se generan colas de camiones en los patios a la espera de ser atendidos por la grúa, caso presente en la Terminal de Contenedores de Buenaventura TCBUEN, lugar donde se desarrollará el presente trabajo de grado. En principio, se busca desarrollar actividades dentro que puedan dar un acercamiento a la solución de este problema como recolectar información pertinente sobre esta operación, para así encontrar las variables y factores críticos del sistema, diseñar diagramas y estudiar los procesos asociados a los flujos de los camiones. Con estos datos se pretende simular el modelo a plantear y brindar conclusiones de utilidad para la Terminal de tal forma que se disminuyan los tiempos de atención a los camiones y se impacten positivamente los procesos logísticos sucesores a este.

1. Planteamiento del Problema

1.1 Marco contextual

La Terminal de Contenedores de Buenaventura TCBUEN es una de las cinco terminales del Puerto de Buenaventura, principal puerto marítimo de Colombia sobre el Océano Pacífico. Se encuentra ubicado en el municipio de Buenaventura, en el Valle del Cauca y es reconocido por su ubicación geoestratégica y sus problemáticas de tipo social. Por medio del Puerto se transporta alrededor del 45% de la carga internacional de Colombia (SICEX Promoting Global Trade, 2021), debido a su excelente ubicación geográfica que le permite tener conexión con alrededor de 300 puertos marítimos en el mundo por los cuales circula mercancía con dirección a todos los continentes, razón por la cual aporta significativamente a la economía regional y nacional.

TCBUEN pertenece a Grup TCB (Terminal de Contenedores de Barcelona), primer operador marítimo español de terminales portuarias. Posee fuertes relaciones con cuatro de las líneas navieras más competitivas del mercado internacional: Grupo A.P. Møller-Mærsk, HAMBURG SUD, CCNI (Compañía Chilena de Navegación Interoceánica) y CSAV (Compañía Sud Americana de Vapores). Para el año 2020, movilizó al

menos 2,4 millones de toneladas de carga (Mundo Marítimo Información Marítima de Latinoamérica, 2021).

Es considerado uno de los terminales portuarios más importantes y avanzados tecnológicamente en Colombia, con una capacidad de manejo de contenedores de alta calidad y una amplia gama de servicios para sus clientes, brindando información precisa y en tiempo real. Dentro de la maquinaria que posee actualmente TCBUEN se encuentran: grúas STS PostPanamax, grúas pórtico, vehículos de transporte de contenedores y grúas RTG (Rubber Tyred Gantry Crane), la cual es operada por conductores a bordo. La función principal de esta grúa es descargar contenedores de camiones o tractores de terminales y cargarlos en el bloque de contenedores o viceversa (Loganx, 22 C.E.) Tanto las grúas RTG como los vehículos de transporte de contenedores presentes en la Terminal hacen parte del proceso que se desea impactar dentro de esta por medio del Trabajo de Grado.

Historia de TCBUEN S.A

Óscar Isaza, un emprendedor de éxito originario de Buenaventura, se propuso hace más de 20 años construir un puerto privado capaz de competir con la Sociedad Portuaria y ofrecer servicios logísticos en el mismo terminal. Isaza contó con el apoyo de la CVC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca), el municipio de Buenaventura y la Gobernación del Valle para construir el primer terminal, el cual fue construido en un terreno de la CVC con una inversión de \$240,000 de dólares (400 millones de pesos). Años más tarde, Isaza promovió la idea en Europa y logró vincular al grupo marítimo de Barcelona TCB, quienes cuentan con muelles en España, Brasil, Turquía y La Habana. TCBUEN comenzó sus operaciones en marzo de 2011, logrando en sus primeros 100 días de operación atender a 36 barcos y movilizar 45,000 contenedores, con un promedio mensual de 11.000 (Periódico El País, 2011).

Esta terminal ha incrementado su capacidad a 600.000 contenedores al año (aproximadamente 12 millones de toneladas), la infraestructura, maquinaria pesada y sistemas de información en tiempo real con inversiones superiores a los USD \$136 millones en los últimos años. Trabaja de cerca con las autoridades al igual que la Sociedad Portuaria competentes ICA (Instituto Colombiano Agropecuario), INVIMA (Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos), DIAN (Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales) y Policía Antinarcóticos para brindar una operación logísticamente exitosa en el manejo de la carga. Además, trabaja estrechamente con las autoridades y la Sociedad Portuaria para garantizar una operación logísticamente exitosa en el manejo de la carga.

1.2 Funcionamiento

Entre los principales servicios brindados por TCBUEN se encuentran: suministro de combustible, remolque, amarre/desamarre, servicios aduaneros, operación de equipos y reparaciones para el caso de la motonave. En cuanto a los servicios ofrecidos a la carga se encuentran, cargue, descargue, clasificación, almacenamiento temporal de contenedores, limpieza, pesaje, embalaje, entre otros.

La Figura 1 muestra la evolución del volumen de tráfico portuario que ha presentado la Terminal durante cuatro años consecutivos en mercancía para exportación e importación debido a la implementación de nuevas tecnologías en su red de transporte lo que le ha otorgado méritos y reconocimientos a nivel mundial, dejando así al Puerto de Buenaventura y al país con reconocimientos gratificantes frente a las demás empresas extranjeras.

AÑO	EXPORTACIÓN	IMPORTACIÓN	TRANSBORDO	Cabotaje embarcado	Cabotaje Desembarcado	TOTAL
2017	322,760	585,144	272,399	-	-	1,180,303
2018	630,990	1,359,527	976,982	3,448	962	2,971,909
2019	740,378	1,379,798	453,499	110	3,644	2,577,429
2020	831,252	1,458,339	200,147	-	-	2,489,737

Medidas: toneladas

Figura 1. Evolución del tráfico de carga TCBUEN. **Tomado de:** Boletín Portuario del Ministerio de Transporte de Colombia.

En la Figura 2 se muestra con más detalle el proceso que debe realizar la grúa RTG para disponer de los contenedores y entregarlos hacia los camiones del terminal. Como se puede observar en la segunda secuencia, si no se encuentra disponible la grúa, el camión debe esperar un tiempo que varía de acuerdo a distintos factores externos, afectando el rendimiento de los procesos posteriores involucrados.

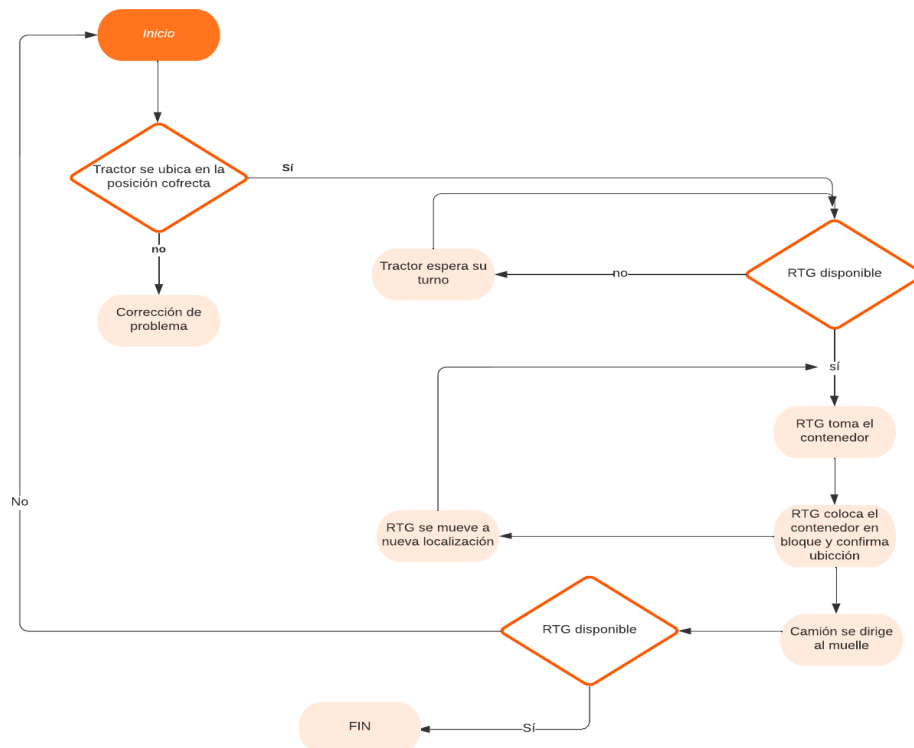


Figura 2. Diagrama de flujo de distribución de grúas RTG. **Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 3 se muestran las causas y efectos en el proceso de descarga de motonaves, el cual es extenso y en él intervienen distintos factores como la marea, la capacidad de las máquinas, la demanda, las habilidades de los operarios y demás personal que interviene, así como la sincronización y disponibilidad de los tractores de terminal. Sin embargo, dentro de este proceso, se encuentra el subproceso de desembarque del contenedor hacia el apilamiento de contenedores, objeto de estudio en el presente trabajo.

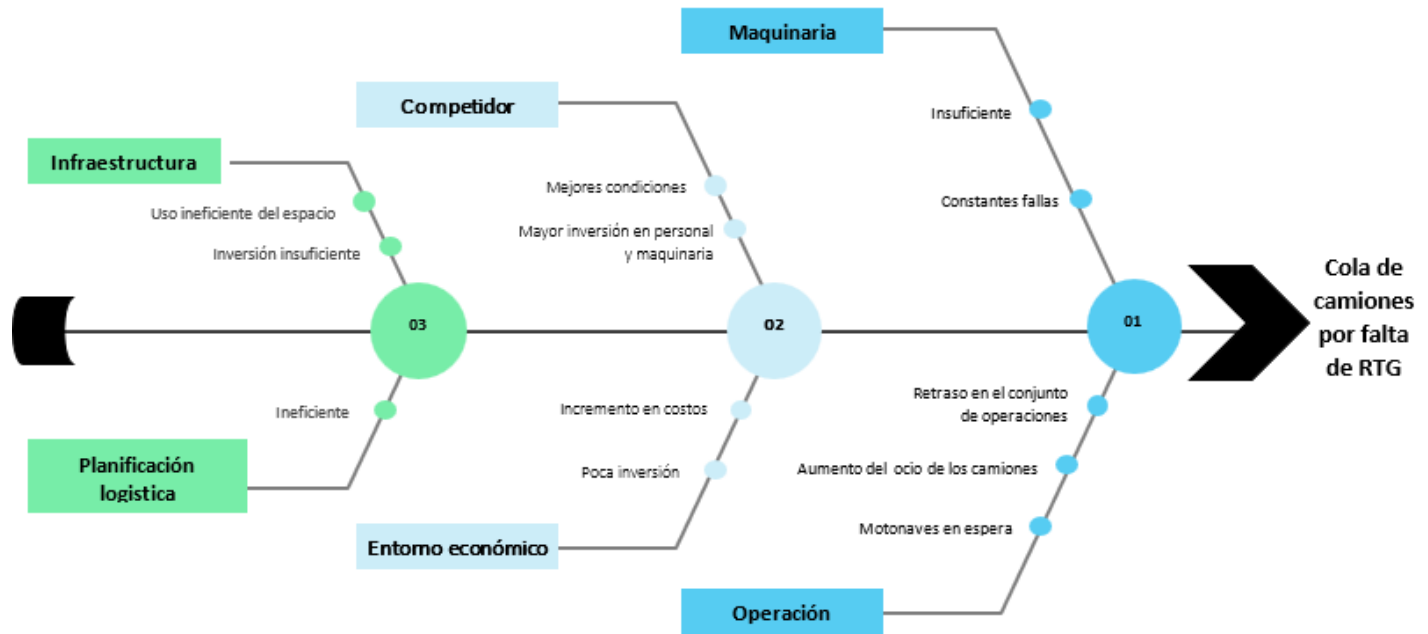


Figura 3. Diagrama de causas y efectos. **Fuente:** Elaboración propia.

El presente trabajo tiene como propósito crear un modelo para analizar la capacidad de descargue de los contenedores que ingresan a la Terminal de Contenedores de Buenaventura y su efecto en la generación de colas internas en los patios, con respecto a los camiones de carga de contenedores, toda vez que los tractores de terminal esperan ser sincronizados con las grúas RTG. Teniendo en cuenta que la capacidad y tiempo de respuesta en el descargue tienen influencia sobre la operación conjunta de la Terminal e implicaciones de tipo económico para los involucrados.

Se propone identificar los factores limitantes en la operación de descargue en la Terminal de Contenedores de Buenaventura que aumentan el tiempo de espera de las motonaves y los tractores de terminal y cómo esta problemática afecta la competitividad y eficiencia del Puerto de Buenaventura, debido a los costos adicionales que el retraso ocasiona mientras la embarcación está en el muelle, ya que tanto el capitán, su tripulación y el Puerto (administración, conductores de camiones y grúas, etc.) retrasan sus operaciones.

Al ser la Terminal de Contenedores de Buenaventura (TCBUEN) parte fundamental del Puerto de este distrito y representar una parte significativa de los ingresos de este y de Colombia en general por medio de aranceles, además de su significancia en la intermediación de importación y exportación de materias primas y productos de todo tipo, se precisa constantemente que existan mejoras en los procesos internos con miras a incrementar la eficiencia, para mantenerse competitivos frente a otros puertos del país y de naciones vecinas. Se pretende por medio de la propuesta de disminución de las colas y de los tiempos de espera, resolver la actual preocupación que la Jefatura Operativa de TCBUEN presenta con el fin de impactar positivamente la organización y sus actividades, así como a los operadores logísticos y de maquinaria. Problemáticas como esta han sido estudiadas por diversos autores como (Alsoufi et al., 2018) y (Gharehgozli et al., 2014) y en otras terminales marítimas del mundo, con la diferencia de que las colas se generan por el desempeño y escasez de grúas distintas a la RTG, sin embargo, no se encuentra preliminarmente información sobre literatura científica desarrollada con esta temática en el Puerto de Buenaventura.

Teniendo en cuenta todo lo anterior se propone la siguiente pregunta:

¿Cuál será la capacidad necesaria de las Grúas RTG en la Terminal de Contenedores en Buenaventura para disminuir las colas de vehículos en espera?

2. Revisión de Literatura

Para facilitar la obtención de información útil para responder la pregunta de investigación del presente Anteproyecto: ¿Cuál será la capacidad necesaria de las Grúas RTG en la Terminal de Contenedores de Buenaventura para disminuir las colas de vehículos en espera?, se plantearon las siguientes palabras clave en español con su respectiva traducción al idioma inglés: (1) terminal de contenedores - container terminal; (2) grúa - crane; (3) asignación - assignment; (4) tractor - truck.

Una vez que hubo conformidad con las palabras clave, se consideraron Web of Science (WoS) y Scopus como los principales motores de búsqueda de información debido a su amplia cobertura y a la facilidad para buscar, filtrar, organizar y analizar que se encontró en el ejercicio de búsqueda realizado.

Se utilizó la cadena de palabras clave en inglés: (Article title, Abstracts, Keywords (“crane AND assignment AND container terminal”)) con la cual se obtuvo un total de 220 documentos encontrados en la primera ronda de búsqueda en Scopus.

Para fines prácticos, se establecieron los siguientes filtros: los idiomas, se excluyeron el idioma chino y persa; tipos de documentos, documentos de sesión, revisión de la conferencia y capítulos de libros; áreas temáticas, Ingeniería, Ciencias de la Computación, Ciencias de la decisión, Ciencias Sociales, Negocios, Gestión y Contabilidad, excluyendo las demás áreas que no se relacionan con el desarrollo del estudio ni aportan al presente trabajo; y palabras clave, asignación de atraque, atraque, patios de ferrocarril, las cuales representan un reto diferente en las terminales de contenedores y que no hacen parte de la investigación de este trabajo. Con estos filtros y exclusiones se obtienen un total de 39 documentos. No se limitó el horizonte temporal en Scopus y WoS debido a que no se consideró como criterio de selección.

Posteriormente, se realizó la segunda ronda de búsqueda en WoS, con la cadena de palabras clave TI = (crane assignment* container terminal*) para obtener un total de 12 artículos, los cuales no cumplieron con los criterios establecidos por los autores. Por esta razón, se trabaja con los 39 documentos hallados en Scopus.

Se descargaron los artículos en formato CSV de Excel y por medio de la herramienta Obtención de datos, se tabularon teniendo en cuenta: nombre de los autores, título del artículo, resumen, palabras clave y categoría.

Luego de la examinación de los 39 artículos descargados, se excluyeron 23 de estos los cuales utilizan tipo de maquinaria, procesos y tecnologías muy diferentes a las que se estudiarán dentro de la Terminal de contenedores de Buenaventura.

En el proceso de búsqueda no se obtuvieron artículos o documentos en habla hispana en los motores de búsqueda seleccionados, sin embargo, se añadió un artículo en español publicado en la revista Cuadernos de Administración, perteneciente a la Universidad del Valle, para un total de 16 artículos examinados a profundidad.

El proceso se explica de manera detallada en la Figura 1.

Cadena de búsqueda (Article title, Abstracts, Keywords ("crane AND assignment AND container terminal"))

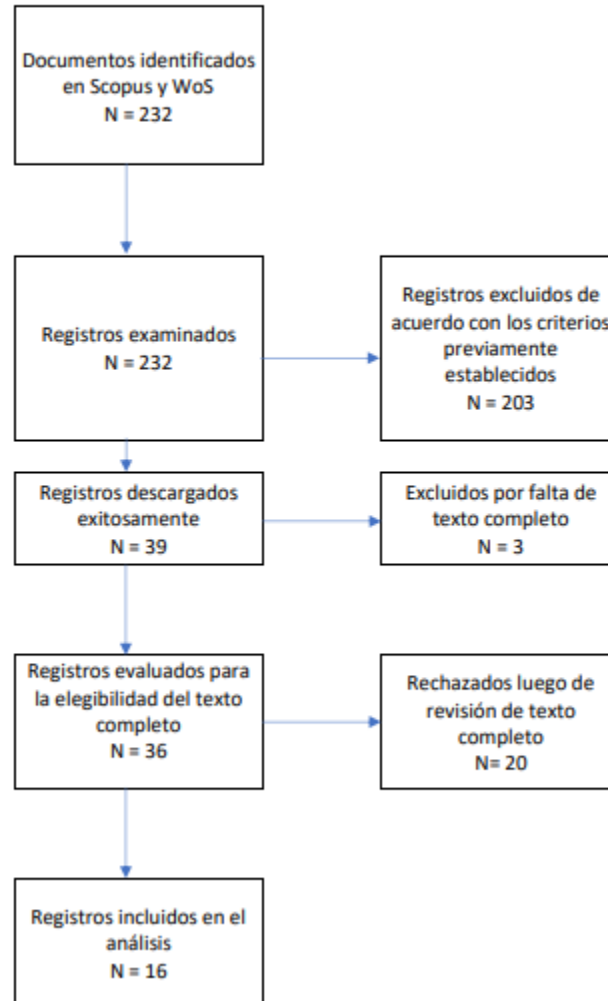


Figura 4. Proceso de selección de literatura. **Fuente.** Los autores

Luego de haber seleccionado la literatura relacionada al presente trabajo, esta se clasificó en las siguientes categorías:

Desempeño de la terminal portuaria: documentos con visión sistémica de la terminal portuaria donde se evidencian las relaciones entre distintos procesos y su incidencia en la productividad de una terminal de contenedores.

Asignación de camiones internos: documentos que utilizan metodologías ingenieriles para optimizar los tiempos de espera de los camiones por trabajo, las distancias y otros recursos utilizados.

Asignación de grúas: documentos que abordan la problemática de asignación de grúas de muelle y RTG teniendo en cuenta factores como personal, disponibilidad de camiones internos, capacidad, entre otros para disminuir los atrasos de las actividades operativas.

Programación de grúas: documentos que emplean distintas metodologías para planificar trabajos para grúas teniendo en cuenta factores como personal, disponibilidad de camiones internos, capacidad, entre otros para disminuir los atrasos de las actividades operativas.

Dentro de las metodologías que fueron utilizadas por los distintos autores de los 16 artículos seleccionados, se destacan:

- Modelo de programación entera mixta
- Modelo de cadena de Markov de tiempo continuo
- Enjambre de partículas
- Modelo de muelle continuo

Así como también se observa que es común el uso de herramientas de simulación para evaluar diferentes escenarios dependiendo de las variables que se consideran en cada modelo, como una forma de demostrar finalmente el impacto sobre la productividad de la operación.

En la Figura 2 se representa gráficamente la distribución de los 16 artículos seleccionados según la categoría en la que se encuentran actualmente.

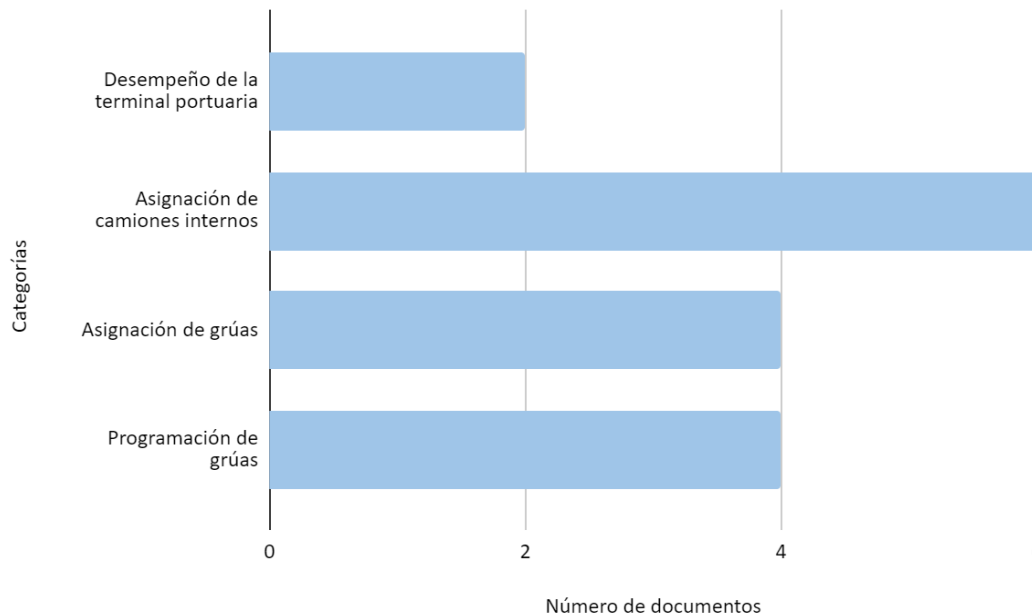


Figura 5. Distribución de documentos según su categoría. **Fuente.** Los autores.

Cabe resaltar que las categorías con mayor número de documentos encontrados son asignación de camiones internos con seis artículos y programación de grúas y asignación de grúas con cuatro cada una. Finalmente, se sintetizó la información analizada por categorías en la Figura 6, la cual alberga los 16 artículos que incluyen una revisión de literatura.

Categoría	Tipo de documento	Temas	Metodología aplicada	Aspectos relevantes para la tesis
Desempeño de la terminal portuaria	Revisión bibliográfica	Terminal de contenedores, muelles, containers	Revisión sistemática con metodología <i>PRISMA</i>	Identificación de los principales factores que influyen en el desempeño de una terminal de contenedores.
	Artículo	Productividad, terminal de contenedores,	Software de simulación <i>ARENA 13.9</i>	Introducción de las colas como problema crítico en la administración de un terminal de contenedores
Asignación de camiones internos	Artículo	Gestión integrada, gestión de contenedores, asignación de camiones de patio	Algoritmo de recocido simulado	Integra las grúas de muelle con los camiones de patio con distintos supuestos que se adaptan al campo de investigación para mejorar la eficiencia de la gestión de contenedores.
	Artículo	Asignación de camiones de patio, ampliación flota, simulación	Modelo de muelle continuo y simulación.	Integra las grúas RTG con los camiones de patio, teniendo en cuenta las secciones de importación, exportación y contenedores vacíos.
	Artículo	Minimización del tiempo, apilamiento de contenedores, patio de contenedores, grúa de patio	Problema asimétrico del viajante de comercio <i>ATSP</i> , algoritmo de ramificación y acotación	Metodología para minimizar los tiempos de desplazamiento del camión de patio para cumplir con todas las solicitudes
	Artículo	Terminal de contenedores, muelles, containers	Modelo heurístico basado en procedimiento Lagrangiana y optimización de subgradiente.	Esta metodología daría énfasis a la disponibilidad limitada y los costos de operación
	Artículo	Productividad, terminal de contenedores, enrutamiento	"Enrutamiento dinámico"	Heurística que implementa reducción de distancias de viaje y ahorros en costos de flota.
	Artículo	Modelación de ciclo simple, doble y mixto	Minimización de viajes de vehículos vacíos	Asignación de camiones para cada una de las tareas reduciendo los costos de uso de vehículos
Asignación de grúas	Artículo	Asignación de amarres, asignación de grúas, programación de grúas	Modelo de programación entera mixta, simulación en <i>CPLEX</i>	Introduce la mezcla entre programación y asignación de grúas teniendo en cuenta distintos supuestos y restricciones
	Artículo	Red de colas, gestión de grúas	Técnicas de simulación	Uso de gráfico de eventos para la gestión de grúas
	Artículo	Red de colas, Asignación, operación de grúas	Simulación de métodos discretos	Tiene aspectos de limitar el tiempo de espera y tener una tasa de finalización del servicio alta.
	Artículo	Programación de grúas teniendo en cuenta el desempeño de los trabajadores y las tareas de camiones de patio	Enjambre de partículas (resolver problema), Modelo de programación entero mixto (reducción de tiempos en salida de buques)	Ahorros de tiempo en la gestión de contenedores y criterios enfocados al desempeño del trabajador
Programación de grúas	Artículo	Programación recursos, terminales portuarias, sistemas de tiempo continuo	Modelo de cadena de Markov de tiempo continuo, red de colas cerrada	Uso de métodos como red de colas cerrada y cadena de Markov en modelos de interacción dinámica entre recursos del terminal
	Artículo	Simulación, secuencia de trabajo, programación de grúas.	Modelación matemática con algoritmos restringiendo el tipo de maquinaria y limitación de espacio; teniendo en cuenta las grúas portico de doble riel.	Usa límites específicos y maquinaria específica (diferente tratada en <i>TCBUEN</i>) que puede dar un acercamiento a los temas a tratar.
	Artículo	Simulación, límites de recursos (mano de obra y máquinas)	Asignación de trabajos a los recursos y disponibilidad de trabajadores	Sugiere una modelación a la planificación de recursos disponibles y sugiere maquinaria automatizada
	Artículo	Programación de grúas y camiones para la distribución de contenedores en el puerto	NP-Hard	Sugiere un modelo heurístico que refleja los lugares de almacenamiento y maquinaria necesaria para los contenedores y así asignar grúas de carga/descarga.

Figura 6. Taxonomía Fuente. Los autores.

Marco Teórico y Estado del Arte

En el desarrollo de las actividades naturales del puerto siempre se quiere tener el mejor método y el más óptimo de realizar las ejecuciones necesarias para que los tiempos de actividades frente al barco de contenedores se logre sacar toda la cantidad necesaria de contenedores a tierra en el menor tiempo posible. Esto debe de estar implementado en todas las áreas del puerto, ya que, como bien se sabe, todas estas actividades generan costos para la empresa y como objetivo es minimizar los costos que genere tanto el barco y el uso de las maquinarias requeridas para poder lograr estas actividades.

Como factores importantes para estas operaciones se deben de tener en cuenta las máquinas necesarias y óptimas para el desarrollo de la misma; la toma de decisiones de estas incurrirá en la resolución de la pregunta planteada como objetivo de lograr, ¿Cuál será la capacidad necesaria de las Grúas RTG en la Terminal de Contenedores en Buenaventura para disminuir las colas de vehículos en espera?.

Para lograr esto, se necesita saber los factores que incurre en este proceso a analizar y los factores anteriores para garantizar de que se logre el menor tiempo posible y tener unas mejores rentabilidades frente a los gastos que pueda generar el barco en el puerto. Tanto como las grúas de muelles y sus operadores son factores importantes los cuales se tendrán en cuenta como hechos para el análisis de todas estas operaciones.

En la literatura se logró extraer unos artículos representativos como desempeño de la terminal portuaria, a consideración propia, y de esta logramos encontrar que la metodología sistemática prisma (Kurniawan et al., 2022) es necesaria para la revisión de esta para lograr los principales factores que estas pueden influir en el desempeño de estos puertos. Se encontró en (Gharehgozli et al., 2014) que hay un software de simulación para identificar los problema de colas en las administraciones con los contenedores dentro de los puertos.

Para esta segunda parte se clasificó la categoría de asignación de camiones internos, y se pudo lograr encontrar que en la literatura usan como métodos algoritmos de recocido (S. Behjat, 2020) para simularlo, este artículo aunque se enfoca en las grúas de muelle, se tienen en cuenta los camiones y los distintos patios y destinos para sus supuestos de adaptación a la mejora efectiva en la gestión de contenedores.

Ya centrándonos un poco en las grúas RTG, que son las máquinas que se analizaron en estos procesos, se encontró en este artículo (Maja Stojaković, 2019) que utilizan un modelo de muelles continuos y desarrollan una simulación para lograr ver su movimiento en el tiempo y encontrar las rutas más óptimas tanto de este tipo de grúas como los camiones en los patios, teniendo en cuenta la importancia del tipo de contenedores para importar o exportar y los contenedores vacíos.

En el siguiente artículo se encontró que se desarrolló un problema asimétrico del viajero de comercio ATSP (Gharehgozli et al., 2014), y utilizaron los algoritmos de ramificación y acotación para encontrar el mínimo de tiempos de desplazamiento de los camiones dentro de los patios para cumplir las solicitudes planteadas desde un comienzo, este artículo se refleja mucho a la toma de decisiones que se necesitan en este trabajo de grado, este se logra entender y aplicar de una forma directa a este ejercicio.

Mientras que en este artículo se desarrolló un modelo heurístico basado en procedimientos Lagrangiana (Fu & Diabat, 2015) y optimización de sub-gradientes, esto nos podría abrir la perspectiva de la metodología

que se debe de implementar si se requiere un énfasis a la disponibilidad limitada los costos de operación que un barco este en el muelle, lograr cuantificar los costos y poder minimizarlos.

Por otro lado, estos autores desarrollaron un modelo llamado “Enrutamiento dinámico” basado en heurísticas que implementados (Nishimura et al., 2005) reducen las distancias de viaje y logran cuantificar el ahorro en costo de flota, este artículo es importante para la recolección de información necesaria para encontrar ese ahorro que es tan llamativo para cualquier empresa, lograr esto podría aportar mucho al desarrollo de la tesis, tanto para las conclusiones como para su implementación en el puerto asignado de estudio.

Además en este artículo (Tsai et al., 2016) proponen una modelación más sencilla, de ciclo simple, doble y mixto, este logra minimizar los vehículos vacíos, factor importante para que no se tengan reprocesos y se logre un mejor uso de estos recursos en los camiones. Pues este propone y lo más relevante para la tesis es la asignación de camiones para una de las tareas de reducción de costo en los vehículos en uso.

Pasando al otro tipo de característica llamada “Asignación de grúas” aquí tienen en cuenta las grúas pórtico sobre neumático de caucho (RTG) y las grúas de muelles que son las implantadas en la terminal, son fijas y su uso es para bajar los contenedores de los barcos a tierra. En esta clasificación se encontró con un artículo (Alsoufi et al., 2018) que desarrollaban una modelación de programación entera mixta, simulado en CPLEX dando así la introducción a la mezcla entre programación de asignación de grúas teniendo en cuenta los distintos supuestos y restricciones específicas que los autores recopilaron para el desarrollo de esta aplicación en uno de los puertos en Alemania.

En otros artículos (Canonaco et al., 2008) se encontraron como temas principales la redes de colas y la gestión de grúas, en esto se desarrolló algunas técnicas de simulación y lo más relevante de esta es la implementación de gráficos de eventos para la gestión de este tipo de grúas.

Otra propuesta (Tengecha & Zhang, 2022) de simulación de métodos discretos tiene como relevancia la limitación de tiempo en espera y tiene una tasa de finalización del servicio alta, este artículo es bastante relevante para el análisis de los criterios que se deben de utilizar, tanto al comienzo como para el desarrollo de esta misma. Este artículo tiene factores importantes para incorporar al desarrollo de esta tesis.

Y por último en esta categoría se encontró un método (Tengecha & Zhang, 2022) el cual no se había tenido en cuenta, el artículo desarrolla un método de enjambre de partículas y un modelo de programación entero mixto para la reducción de tiempos de salida de buques, este genera ahorros de tiempos en la gestión de contenedores y criterios enfocados al desempeño del trabajador, este artículo en su totalidad o conclusiones no son relevantes, pero los criterios de decisión y la gestión interna con los camiones y grúas son de mayor importancia, se extrajo esta información particular.

La última categoría se titula “Programación de grúas” en esta se clasificó los artículos con este enfoque. El primer artículo (Dhingra et al., 2017) en la categorización se encontró que desarrollaba un modelo de Cadena de Markov de tiempo continuos enfocado en la redes de colas cerradas, este método es relevante para nuestro análisis por que genera un modelo de interacción dinámica entre los recursos del terminal, factores importantes para la realización de esta misma.

Además en el artículo (Stahlbock & Voß, 2010), se encontró ya un estudio referente a las maquinarias, fue una modelación matemática con algoritmos que se registraron en los tiempos de maquinaria y las limitaciones de los patios, teniendo así en cuenta la cantidad de grúas pórtico dobles riel que se requieren. En comparación a la maquinaria a evaluar en esta tesis son diferentes pero la modelación de los métodos tienen un grado de similitud. Estas usan límites de espacios específicos para estas maquinarias que en su totalidad no son las mismas que utilizan en la terminal de contenedores de Buenaventura pero el uso y la idea general de la máquina es lo mismo.

En el artículo (Hartmann, 2004), los temas tratados son la simulación y los límites de los recursos tanto como mano de obra y las máquinas utilizadas. Estos autores utilizaron una asignación de trabajos a los recursos y las disponibilidades de los trabajos, tanto horas dispuestas por trabajador como horas en uso del recurso (personal y maquinaria). Esto sugirió la modelación de planificación de los recursos porque se encontró que las disposiciones se mejoran con una maquinaria automatizada.

Y en el artículo (Bish, 2003), se presentó un modelo “NP-HARD” sugiriendo como modelo heurístico que refleja los lugares de almacenamiento de maquinaria y de contenedores para así poder asignar las grúas de carga o descarga y obtener una mayor optimización de este tipo de recursos.

Se concluye que dentro de la literatura elegida por los autores, tanto la asignación de grúas como la de camiones de patio representan un gran reto para diferentes terminales alrededor del mundo y son problemas de gran importancia debido a que tanto las grúas como los camiones son recursos de un valor económico muy alto y su desempeño repercute en el desempeño de la terminal y en los costos que se generan dentro de esta. Los artículos encontrados abordan estas problemáticas de forma separada o abordan una de las dos únicamente, sin embargo, se encuentran similitudes que pueden ser utilizadas como punto de partida para la recolección exhaustiva de datos, para contextualizar los efectos que generan las colas internas de camiones en espera y las mejoras que se han realizado en estos campos en distintas terminales.

También, es importante mencionar que son distintas las formas de abarcar las problemáticas antes mencionadas, dependiendo esto de factores externos y la complejidad del caso de estudio, siendo esta diversidad un aterrizaje para conocer distintos puntos de vista y de trabajo de autores con experiencia en el campo de las terminales portuarias.

Por otro lado, cabe destacar que no se encontraron dentro de los documentos seleccionados trabajos llevados a cabo en la Terminal de Contenedores de Buenaventura en el área de patios ni en patios de otras terminales del Puerto del mismo Distrito. Esto representa una oportunidad para realizar investigación en un campo que no ha sido estudiado y sobre todo, que no ha sido abarcado en conjunto, es decir, tratando las dos problemáticas dentro del mismo estudio.

3. Objetivos

Objetivo general

Proponer un modelo para el análisis de la capacidad de las grúas RTG en una Terminal de Contenedores, buscando la disminución de las colas de vehículos en espera por dicho servicio.

Objetivos específicos

1. Describir el sistema de ingreso de camiones con carga hacia la Terminal de contenedores caso de estudio, identificando elementos críticos asociados a las esperas y al uso de las grúas RTG en dicho sistema.
2. Diseñar un modelo para el análisis de las esperas de camiones, que permita estudiar la capacidad de los servidores o grúas RTG en el contexto de la atención a un barco.
3. Evaluar el modelo desarrollado a través de herramientas de simulación, que permita establecer conclusiones respecto a la capacidad de las grúas RTG y su impacto en la disminución de las esperas.

4. Metodología

La metodología a implementar para dar cumplimiento a los objetivos planteados anteriormente, se encuentra ligada a diversos factores propios de TCBUEN como el sistema de recolección de datos que emplean actualmente, la periodicidad con la que son medidos, las herramientas para dicho procedimiento, así como otros factores que están vinculados al proceso objeto de estudio. También, está articulada al alcance que se puede abarcar desde la Ingeniería Industrial.

Partiendo de la existencia del fenómeno que en este caso es la ocurrencia de las colas de camiones en espera, de la posible recolección, toma y análisis de datos cuantitativos para encontrar la relación entre las distintas variables que intervienen en él y los demás parámetros que influyen en la disponibilidad de la grúa RTG en la práctica, se considera la metodología de tipo cuantitativa para este caso de estudio.

FASE 1: REVISIÓN DE DATOS: En esta fase se va a indagar y recolectar información, datos, estadísticas y diagramas relevantes para el conocimiento de este problema en donde se clarifique, de manera cuantificable, en qué momento y qué características se encuentran en el sistema de ingreso de camiones con carga hacia la Terminal de contenedores caso de estudio, identificando elementos críticos asociados a las esperas y al uso de las grúas RTG en dicho sistema. Las actividades a implementar en esta fase serán:

- Visitar la terminal de contenedores de Buenaventura para entender con claridad el problema y obtener los datos seleccionados.
- Se realizarán reuniones con el jefe de operaciones marítimas Sociedad Portuaria Terminal de Contenedores de Buenaventura (Alex David Pinzón Vivas) donde se facilitarán dichos requerimientos para proceder a la depuración de la información.
- Depurar la información obtenida para analizar si existen patrones, datos atípicos o cualquier otro tipo de información relevante para el modelo.

FASE 2: CONSTRUCCIÓN PRELIMINAR DEL MODELO: Para lograr la construcción del modelo para el análisis de las esperas de camiones, que permita estudiar la capacidad de los servidores o grúas RTG en el contexto de la atención a un barco, se estudiará la simulación discreta de este modelo, recopilando las variables y diferentes parámetros que afecten este tipo de logística dentro de la terminal. Teniendo en cuenta que este será un modelo implementando la teoría de líneas de espera. Como actividades a realizar en esta fase:

- Diseñar los diagramas de proceso asociados a la entrada de camiones que prestan servicio a un barco, indicando las filas (esperas), las operaciones involucradas, los recursos utilizados (RTG y otros) y los tiempos de proceso en cada operación.

- Estudiar la información de llegada de camiones y determinar el tiempo promedio entre llegadas y la distribución de probabilidad de dichos tiempos.
- Estudiar los tiempos de operación de las RTG, la variabilidad de estos tiempos y la distribución de probabilidad de dichos tiempos.
- Determinar la conexión precisa entre el flujo de llegada de camiones y las necesidades de un barco en condiciones normales.

FASE 3: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO: Teniendo en cuenta los resultados de la fase anterior, se evaluará el modelo con respecto a las herramientas específicas de la simulación permitiendo establecer conclusiones respecto a la capacidad de las grúas RTG y su impacto en la disminución de las esperas. Para lograr cumplir con esta implementación se deberá:

- Realizar un modelo relacionado con la Teoría analítica de líneas de espera, simulable según la metodología de simulación discreta con redes de Petri.
- Caracterizar la fila según la notación de Kendall-Lee.

FASE 4: DOCUMENTACIÓN Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS: Se concretará reuniones con los directores del trabajo para verificar, ajustar y concluir con certeza los resultados que se generaron en la simulación implementada, se formalizan los resultados obtenidos para poder divulgarlos y concluir este proyecto de grado. Para esta última fase las actividades asignadas son:

- Simular la dinámica del modelo propuesto con el uso de herramientas computacionales (Python, R, etc.), para verificar el comportamiento de los servidores (RTG's) ante la dinámica de ingreso de camiones en el contexto de la atención a un barco.
- Establecer conclusiones de utilidad para la empresa, respecto al uso de RTG's en el contexto estudiado buscando disminuir las esperas.

5. Cronograma de Actividades

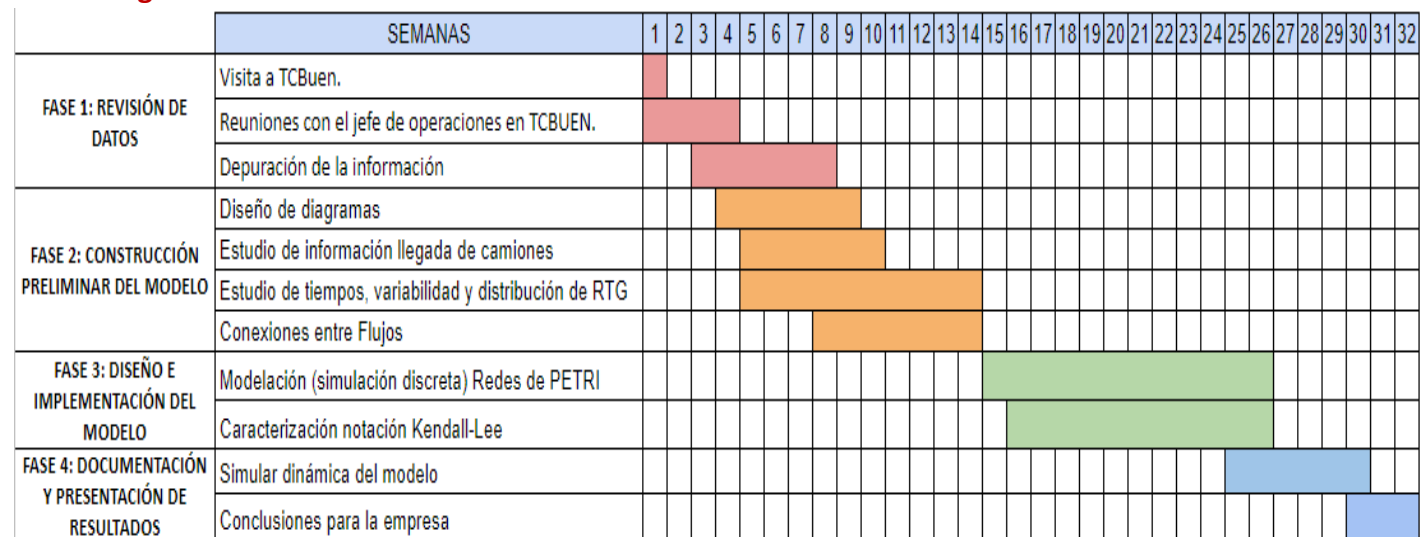


Figura 7. Diagrama de Gantt Trabajo de Grado. Fuente: los autores.

6. Referencias

- Loganx. (22 C.E., September 21). *Grúas y Aparejos*.
Periódico El País. (2011, May 13). *Inauguran oficialmente nueva terminal de contenedores en Buenaventura*.
- Alsoufi, G., Yang, X., & Salhi, A. (2018). Combined quay crane assignment and quay crane scheduling with crane inter-vessel movement and non-interference constraints. *Journal of the Operational Research Society*, 69(3), 372–383. <https://doi.org/10.1057/s41274-017-0226-3>
- Bish, E. K. (2003). A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal. *European Journal of Operational Research*, 144(1), 83–107. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00382-4](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00382-4)
- Canonaco, P., Legato, P., Mazza, R. M., & Roberto Musmanno. (2008). A queuing network model for the management of berth crane operations. *Computers and Operations Research*, 35(8), 2432–2446. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.12.001>
- Dhingra, V., Roy, D., & de Koster, R. B. M. (2017). A cooperative quay crane-based stochastic model to estimate vessel handling time. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 29(1), 97–124. <https://doi.org/10.1007/s10696-015-9225-3>
- Fu, Y.-M., & Diabat, A. (2015). A Lagrangian relaxation approach for solving the integrated quay crane assignment and scheduling problem. *Applied Mathematical Modelling*, 39(3–4), 1194–1201. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.07.006>
- Gharehgozli, A. H., Yu, Y., de Koster, R., & Udding, J. T. (2014). An exact method for scheduling a yard crane. *European Journal of Operational Research*, 235(2), 431–447. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.038>
- Hartmann, S. (2004). A general framework for scheduling equipment and manpower at container terminals. *OR Spectrum*, 26(1), 51–74. <https://doi.org/10.1007/s00291-003-0149-z>
- Kurniawan, F., Musa, S. N., Moin, N. H., & Sahroni, T. R. (2022). A Systematic Review on Factors Influencing Container Terminal's Performance. *OPERATIONS AND SUPPLY CHAIN MANAGEMENT*, 15(2), 174–192.
- Maja Stojaković, E. T. (2019). The Influence of Yard Trucks on Berth Operations in Smaller Container Terminals. *Multidisciplinary SCIENTIFIC JOURNAL OF MARITIME RESEARCH*, 33, 171–175.
- Nishimura, E., Imai, A., & Papadimitriou, S. (2005). Yard trailer routing at a maritime container terminal. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 41(1), 53–76. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2003.12.002>
- S. Behjat, N. N. (2020). Quay cranes and yard trucks scheduling problem at container terminals. *International Journal of Engineering*, 33(9), 1751–1758. <https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.09c.08>
- Stahlbock, R., & Voß, S. (2010). Efficiency considerations for sequencing and scheduling of double-rail-mounted gantry cranes at maritime container terminals “Efficiency considerations for sequencing and scheduling of double-rail-mounted gantry cranes at maritime container terminals.” In *Int. J. Shipping and Transport Logistics* (Vol. 2, Issue 1).
- Tengecha, N. A., & Zhang, X. (2022). An Efficient Algorithm for the Berth and Quay Crane Assignments Considering Operator Performance in Container Terminal Using Particle Swarm Model. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(9), 1232. <https://doi.org/10.3390/jmse10091232>
- Tsai, F.-M., Lu, C.-C., & Chang, Y.-M. (2016). A network model for solving the yard truck routing and scheduling problem. *The International Journal of Logistics Management*, 27(2), 353–370. <https://doi.org/10.1108/IJLM-09-2014-0158>

SICEX Promoting Global Trade. (2021, June 18). *¿Cuál es la importancia del puerto de Buenaventura para Colombia?*

Mundo Marítimo Información Marítima de Latinoamérica. (2021, July 12). *Puerto de Buenaventura Colombia: ANI destaca por inversiones en nuevas tecnologías y equipos de concesionarios.*