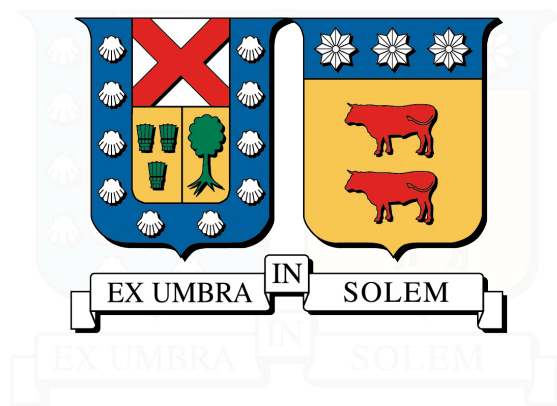


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
SANTIAGO - CHILE



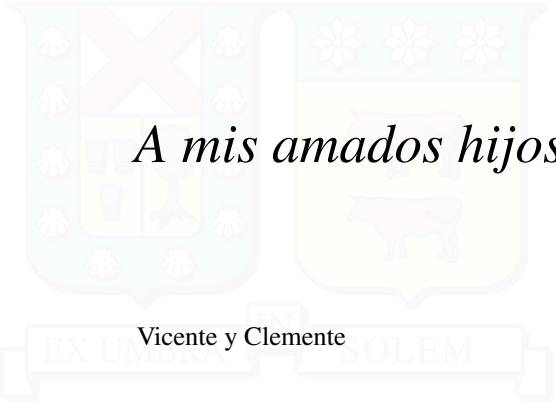
**EVALUACION DE ALTERNATIVAS PARA DISMINUIR COLA DE CAMIONES
EN TERMINAL INTERNACIONAL SAN ANTONIO, PROCESO INGRESO
CONTENEDORES VACIOS**

MARCELA SILVA FRIAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA : SR. PABLO ESCALONA R.
PROFESOR CORREFERENTE : SR. RAUL STEGMAIER B.

ENERO 2016



A mis amados hijos . . .

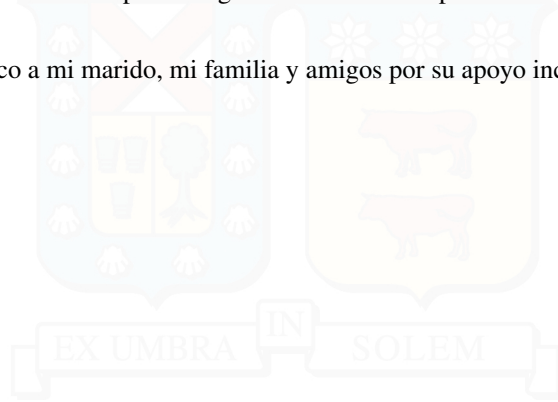
Vicente y Clemente

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a a los señores Yurik Diaz, Mario Elgueta, Gabriel Saldivia, Pedro González y Roberto Zúñiga de San Antonio Terminal Internacional por darme la oportunidad de realizar mi tesis en dicho Terminal y en especial por sus gestiones y su tiempo dedicado.

Quiero agradecer además a mi profesor guía Pablo Escalona por todo su apoyo y orientación en esta tesis.

Por último agradezco a mi marido, mi familia y amigos por su apoyo incondicional.



RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo evaluó distintas alternativas para minimizar las filas de camiones en el Puerto de San Antonio, particularmente el terminal internacional de San Antonio, proceso de ingreso de contenedores vacíos. Actualmente debido a la creciente demanda en las transferencias de carga marítima, ha aumentado la congestión de calles y terminales portuarios por la gran cantidad de camiones que deben ingresar diariamente al puerto, esto causa ineficiencias dentro del terminal, congestión de calles, contaminación y reclamos de los ciudadanos.

El proceso de ingreso de contenedores vacíos se modeló a través de un grafo $G(N, A)$, para determinar la capacidad y cantidad de servidores en cada nodo se utilizó teoría de filas y redes de Jackson, de esta forma se puede obtener el largo de fila y tiempo de espera de cada nodo. Además se realizó una simulación con distintos escenarios para la entrada promedio de camiones con el objeto de determinar si era suficiente aumentar la cantidad de servidores en los nodos.

Se analizó uno de los meses de temporada alta para determinar el tiempo entre llegadas y la frecuencia de llegada de los camiones. Se decidió trabajar con un valor de 55 para la tasa de entrada promedio de camiones ya que la probabilidad estimada de que lleguen menos de 55 camiones es de un 88 %. El coeficiente cuadrado de variación de tiempo entre llegadas es 7, el cual indica que existe una alta variabilidad en la llegada de camiones.

Como conclusión se puede indicar que se debe aumentar la cantidad de servidores en los nodos ingreso y acopio, pero dependiendo de la demanda promedio en el ingreso de camiones, esta medida no es suficiente y se debe crear un sistema de citas o reservas para el ingreso de camiones, para regular el tiempo entre llegadas de camiones.

Índice de Contenidos

1. Descripción del Problema	1
2. Objetivos	5
2.1. Objetivo General	5
2.2. Objetivos Específicos	5
3. Estado del Arte	7
3.1. Uso de Investigación de Operaciones en Terminales Portuarios.	7
3.2. Recepción y Despacho.	8
3.3. Transporte Terrestre	8
3.4. Gestión en la Recepción de Camiones	9
3.5. Teoría de Colas	10
3.6. Características de un sistema de colas.	11
4. Análisis del Problema	13
4.1. Descripción Terminal	13
4.1.1. Demanda	14
4.2. Descripción Proceso Recepción de Contenedores Vacíos	16
4.2.1. Pre Gate	16
4.2.2. Inspección y Recepción	16
4.2.3. Acopio y Despacho	17
4.2.4. Descripción Zonas Recepción Contenedores Vacíos	17
5. Formulación Modelo	21
5.1. Red de Proceso	21
5.2. Parámetros	21
5.3. Entradas netas	22
5.4. Capacidad nodo en estado estable	22
5.5. Coeficiente cuadrado de variación del tiempo entre llegadas	23
5.6. Parámetros de interés	23
6. Implementación	25
6.1. Sistema Despacho Contenedores Vacíos	25
6.1.1. Red del Proceso	25
6.1.2. Parámetros	26
6.1.2.1. Tasa de Entrada Promedio	26
6.1.2.2. Probabilidad que el cliente pase del nodo i al nodo j	27
6.1.2.3. Capacidad servidor de cada nodo	27
6.1.2.4. Coeficiente cuadrado de variación del tiempo de proceso	28
6.1.2.5. Coeficiente cuadrado de variación de la tasa de entrada promedio	28
6.1.3. Entradas Netas	28
6.1.4. Capacidad Nodo en Estado Estable	29

6.1.5. Coeficiente cuadrado de variación del tiempo entre llegadas	30
6.1.6. Parámetros de Interés	30
7. Simulación y Mejoras Complementarias	33
7.1. Largo de Fila para distintos λ	33
7.2. Largo Fila al disminuir C_{λ}^2	36
7.3. Mejoras Complementarias	39
7.3.1. Sistema de Citas	39
7.3.2. Política de Incentivos	40
8. Evaluación Económica	41
8.0.1. Nodo Ingreso	41
8.0.2. Nodo Acopio	43
8.1. Implementación Sistema de Citas	44
8.2. Costos Totales	44
8.2.1. Costos Fijos	44
8.2.2. Costos Variables	45
9. Conclusiones	47
Bibliografía	49

Índice de Tablas

4.1. Distribución de yardas dentro del terminal	20
5.1. Parámetros a utilizar en el modelo	22
6.1. Histograma para la llegada de Camiones	26
6.2. Capacidad y Tiempo de Proceso de cada nodo con un servidor	27
6.3. Coeficiente cuadrado de variación del tiempo de proceso	28
6.4. Cálculo de servidores por nodo	30
6.5. Resumen Cálculo Parámetros de Interés	31
7.1. Servidores necesarios para cada nodo para distintos λ , manteniendo el sistema en estado estable	34
7.2. Largo Fila para distintos λ	34
7.3. Resultados para el Nodo Ingreso con distintos valores para λ	34
7.4. Resultados para el Nodo Acopio con distintos valores para λ	35
7.5. L_q (Largo fila en cada nodo) para distintos C_λ^2	36
7.6. W_q (Tiempo esperado en la fila de cada nodo) para distintos C_λ^2	37
7.7. Largo de fila con $C_\lambda^2 = 2$	37
7.8. Largo de fila con $C_\lambda^2 = 1$	38
7.9. Cuadro Comparativo para $\lambda = 55$	38
7.10. Cuadro Comparativo para $\lambda = 50$	39
8.1. Inversión Nodo 3	42
8.2. Total Costos fijos Nodo 3	42
8.3. Total Costos Variables Nodo 3	43
8.4. Total Costos fijos Nodo 4	43
8.5. Total Costos Variables Nodo 4	43
8.6. Costos Sistema de Citas	44
8.7. Total Costos Fijos	44
8.8. Total Costos Variables	45



Índice de Figuras

1.1. Distribución del mercado de terminales portuarios en la zona central	1
1.2. Camiones recepcionados Febrero-Abril 2016	2
3.1. Notación de Kendall	12
4.1. Evolución Capacidad Barcos	15
4.2. Evolución mensual carga contenedorizada	15
4.3. Proyección Demanda	16
4.4. Áreas cercanas al terminal que participan del proceso	17
4.5. Baroti	18
4.6. Grúa de Patio Contenedores Vacíos	19
4.7. Plano Terminal Parte 1	19
4.8. Plano Terminal Parte 2	20
5.1. Representación de un proceso de servicio a través de un Grafo	22
6.1. Grafo Escenario con 4 nodos	26
6.2. Histograma para la llegada de contenedores por hora	27
6.3. Ecuaciones de balance	29
6.4. Variabilidad dentro del Grafo	31
7.1. Comportamiento en el nodo ingreso al cambiar el valor de λ	35
7.2. Comportamiento en el nodo acopio al cambiar el valor de λ	35
7.3. L_q para distintos C_λ^2	36
7.4. Largo de fila con $C_\lambda^2 = 2$	37
7.5. Largo de fila con $C_\lambda^2 = 1$	38



1 | Descripción del Problema

El crecimiento continuo del volumen de contenedores ha impuesto cargas significativas en las operaciones terrestres de los puertos marítimos. Muchos puertos marítimos se enfrentan a una grave congestión tanto en la puerta como en el patio debido a un gran número de camiones que llegan al terminal durante los períodos peak. La congestión da lugar a un tiempo de espera del camión, la contaminación del aire y una menor eficiencia en el funcionamiento del terminal. Por lo tanto, la forma de disminuir el tiempo de espera de los camiones es un tema importante para la terminal, los transportistas y los reguladores del gobierno [Zhang et al. \(2013\)](#).

STI es el terminal portuario más moderno y eficiente de Chile, opera la concesión del Frente de Atraque Molo Sur del Puerto de San Antonio, la cual incluye los sitios 1, 2 y 3. Sus principales clientes son las navieras Mediterranean Shipping Company (MSC), Maersk, Hamburg Sud, Hapag Lloyd, Evergreen, CMA CGM (Navieras mas importantes a nivel mundial).

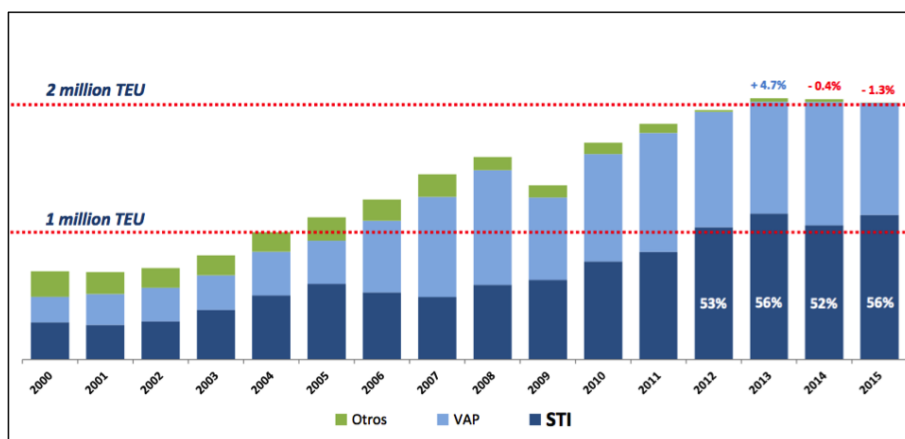


Figura 1.1: Distribución Mercado

(Fuente: Terminal Internacional San Antonio)

STI inicia sus operaciones el año 2000, a la fecha ha logrado posicionarse como líder del mercado tanto dentro de la zona central como dentro de Chile, como se puede observar en la Figura 1.1, donde se aprecia cómo ha ido aumentando su demanda en la zona central, actualmente sus operaciones representan un 56 % del mercado de la zona central (incluye el Puerto de Valparaíso). El año 2015 movilizó mas de 1,1

millón de TEU.¹

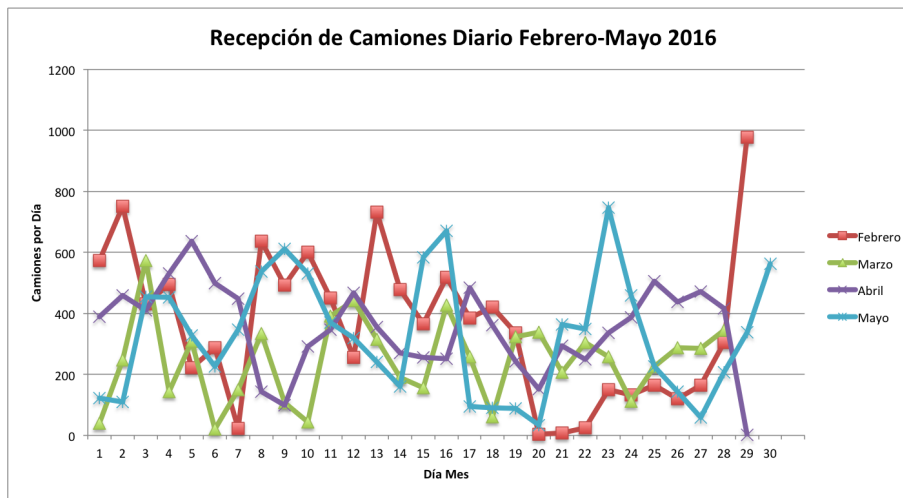


Figura 1.2: Camiones recepcionados Febrero-Abril 2016

(Fuente: Elaboración Propia)

Diariamente se transfieren mas de mil contenedores diarios en STI. La demanda continúa creciendo y se estima que el año 2030 habrá crecido en mas de un 48 % ([Undersecretariat of Transport \(2013\)\)](#).

A raíz del contínuo crecimiento de la cantidad de contenedores que se transfieren diariamente en en puerto de San Antonio ha crecido también la cantidad de camiones que transitan por las principales calles de la ciudad, hoy en día existe una alta congestión de camiones en temporada alta, tanto dentro como fuera del terminal, causando contaminación, tiempos de espera, disminución de la productividad y causando molestias a la población, debido a la contaminación y congestión de calles, las molestias incluso han terminado en manifestaciones contra STI. El problema se ve agravado cuando la congestión se produce dentro del terminal y se deben cerrar los pórticos para que no entren nuevos camiones lo cual causa filas interminables de camiones en las calles de San Antonio.

En esta memoria se analizará la gestión camionera y el tiempo de espera de los camiones que transportan contenedores vacíos en el Terminal Internacional de San Antonio (En adelante STI o terminal), los cuales representan el 30 % de los contenedores totales movilizados. En la Figura 1.2 se muestra el ingreso de contenedores vacíos para los meses Febrero-Mayo 2016, donde se puede ver que existe una alta variabilidad en la llegada de contenedores al puerto.

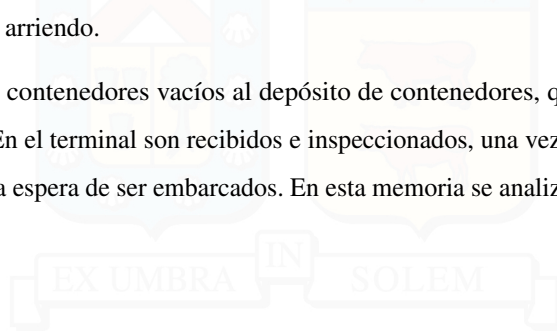
Actualmente existe un pórtico para los contenedores vacíos y dentro del patio existe una grúa que realiza el acopio de los contenedores, la grúa tiene una capacidad de 40 camiones por hora, por lo que si se presentan mas camiones dentro de una hora determinada se forma congestión dentro y fuera del terminal. El objetivo propuesto es analizar las alternativas para disminuir la cola de camiones ya sea a través de la

¹Las siglas TEU (acrónimo del término en inglés Twenty-foot Equivalent Unit, que significa Unidad Equivalente a Veinte Pies) representa una unidad de medida de capacidad inexacta del transporte marítimo (Buques portacontenedores y terminales portuarios para contenedores)

incorporación de más grúas en el patio, incorporando más pórticos en las horas punta o bien, disminuyendo la variabilidad en el ingreso de camiones.

En el ingreso de contenedores vacíos al terminal intervienen el armador, los depósitos de contenedores y los transportistas. El armador es el dueño de los contenedores los cuales son arrendados por los exportadores/importadores para trasladar su mercancía de un puerto a otro. Cuando la mercadería llega a su destino final el contenedor queda vacío y es devuelto a un depósito de contenedores donde se almacena y se repara si es necesario para un nuevo arriendo.

El armador solicita contenedores vacíos al depósito de contenedores, quién los envía al terminal a través de un transportista. En el terminal son recibidos e inspeccionados, una vez en el patio son descargados por una grúa y apilados, a la espera de ser embarcados. En esta memoria se analizará el Proceso de Recepción de Contenedores.





2 | Objetivos

2.1. Objetivo General

Analizar y evaluar económicamente alternativas para reducir tiempo de espera en la fila de camiones en el proceso recepción contenedores vacíos del terminal STI, usando teoría de filas, con el objetivo de aumentar productividad y disminuir la congestión dentro del terminal.

2.2. Objetivos Específicos

- 1 Analizar proceso de Recepción de Contenedores Vacíos en STI.
- 2 Obtener grafo representativo del proceso a analizar, determinando para cada nodo lo siguiente:
 - a Determinar tasa de llegada de camiones.
 - b Determinar variabilidad del tiempo de servicio en cada proceso.
 - c Determinar variabilidad de llegadas de camiones desde el exterior del terminal.
 - d Determinar demanda promedio para cada nodo.
- 3 Encontrar el nodo donde se produce el cuello de botella y encontrar alternativas para minimizar el tiempo esperado.
- 4 Evaluación económica de alternativas propuestas



3 | Estado del Arte

3.1. Uso de Investigación de Operaciones en Terminales Portuarios.

Hoy en día, los puertos se están preparando para afrontar el reto de manejar mega-buques capaces de llevar entre 10.000 y 12.000 TEU o aún mas (véase por ejemplo, Baird (2006) para una visión general del aumento de tamaño de los buques y el crecimiento del tráfico). Los factores clave para un terminal de contenedores son la eficiencia del stacking (apilamiento) y el transporte para un gran número de contenedores desde y hacia el costado del buque. La productividad en la transferencia de los contenedores desde el patio al muelle y viceversa influye en los costos, los cuales son vitales para un operador portuario para aumentar su competitividad. Por otra parte, las compañías navieras necesitan que los operadores portuarios sean confiables en las fechas de entrega y en los tiempos de manipulación (véase, por ejemplo, los ocho principales factores determinantes de la competitividad portuaria discutidos por Tongzon y Heng (2005)). Wang y Cullinane (2006) diagnostican que los proveedores de los servicios de manipulación de contenedores en los puertos tienen una posición negociadora débil en comparación con la de las compañías navieras. Por lo tanto, los puertos de contenedores se ven obligados a prestar servicios eficientes y rentables. Tienen que realizar grandes inversiones para cumplir con las estrictas exigencias y así lograr un servicio más rápido y de mayor calidad. Recientemente, Shi y Voß(2007) han analizado las relaciones entre alianzas de transporte y las operaciones de un terminal de contenedores ([Stahlbock y Voß, 2008](#)).

La competencia entre los terminales de contenedores se ha incrementado debido a las grandes tasas de crecimiento en las principales rutas de contenedores por vía marítima. Los terminales deben enfrentar un mayor número de contenedores que deberán ser manipulados en poco tiempo a un bajo costo. Por lo tanto, se ven obligados a aumentar la capacidad de manipulación y la productividad. Para satisfacer la demanda actual y futura se han utilizado diferentes lineamientos. Un enfoque revolucionario son los nuevos terminales con diseños avanzados los que requieren automatización y nueva infraestructura, en particular en regiones con altos costos de mano de obra. Otro enfoque es el reemplazo de los equipos más antiguos por unos más eficientes. Por otra parte, la infraestructura y los equipos existentes se pueden utilizar de manera más eficiente a través de la tecnología de la información y de sistemas de software para el control de la logística incluyendo

métodos de optimización (Günther y Kim 2006). Por otra parte, la infraestructura necesita ser desarrollada y ampliado para hacer frente a futuros desarrollos tales como fueron la ampliación del Canal de Panamá y la disponibilidad de los buques portacontenedores cada vez más grandes (Stahlbock y Voß, 2008).

3.2. Recepción y Despacho.

La recepción y despacho de contenedores se realizan entre la zona de almacenamiento y los sistemas de transporte terrestre, como carreteras y líneas férreas. De acuerdo a (Siegel, 1999) el sistema de interfaz con transporte terrestre comprende tres procesos: proceso de llegada del modo terrestre, proceso de recepción/control de carga y proceso de carga /descarga de los vehículos y viceversa (González Cancelas, 2007).

El proceso de llegada está compuesto principalmente por la frecuencia de llegada de camiones y el intervalo de tiempo durante el cual esta llegada se produce, dado que las terminales cuentan con períodos específicos habilitados para la recepción de camiones. El proceso de recepción y control de carga representa, principalmente, los controles administrativos de aduana por los que debe pasar un camión para el retiro o entrega de un contenedor. El proceso de carga y descarga de camiones representa la transferencia de carga de un contenedor hacia y desde las zonas de almacenamiento respectivas, dado a que como ya se explicó, en las terminales de contenedores se usa principalmente la ruta indirecta de la carga. En general existen dos formas mediante las cuales se ha estudiado el sistema de interfaz. Una forma consiste en abordar el sistema como un problema de tráfico y otra forma como un problema operativo (González Cancelas, 2007).

3.3. Transporte Terrestre

Mientras que la planificación de rutas vehiculares (VRP) han atraído la atención de muchos investigadores sólo unos pocos documentos se centran en problemas con camiones y remolques (véase, por ejemplo, Chao 2002; Scheuerer 2006; Tan et al 2006). Chao (2002) prueba un método de Búsqueda Tabu (TS) mejorando las soluciones que se encuentran inicialmente por un método de construcción. Se consideran veintiún instancias del problema de ruteo del camión y el remolque basado en siete VRP básicos de la conocida CMT-conjunto de problemas de prueba (Christofides et al. 1979). Scheuerer (2006) introduce dos simples heurísticas de construcción eficientes y una heurística TS para resolver el problema de ruteo propuesto en Chao (2002) del camión y el remolque. Si bien los resultados computacionales muestran que las nuevas heurísticas son competitivas con los enfoques existentes, el algoritmo TS obtuvo mejores soluciones para cada uno de los 21 problemas de referencia de Chao. Tan et al. (2006) introducen un problema de transporte para mover contenedores vacíos o cargados de una empresa de logística con un número limitado de camiones

y remolques. Se aplica un algoritmo evolutivo multiobjetivo híbrido para encontrar la ruta óptima de Pareto (Stahlbock y Voß, 2008).

Nishimura et al. (2005) proponen un método de asignación de remolque para resolver el problema de enrutamiento dinámico en los terminales de contenedores donde las yardas son asignadas a grúas de muelle específicos hasta que se complete el trabajo. Se muestra un nuevo esquema de enrutamiento dinámico. Su objetivo es el ahorro de tiempo de operación en el patio, así como los costos de manipulación de contenedores. El documento examina el problema de la recepción y la entrega con múltiples recorridos que se mantiene independiente y no está conectado a un depósito (como en el problema tradicional de recepción y entrega). El enrutamiento de remolque se define con un conjunto dado de buques que hacen escala. Una nueva decisión de enrutamiento se hace cuando un barco inicia la carga o descarga. Una flota de remolques tiene un conjunto de recorridos de conexión entre las grúas de muelle y los puntos de pila en el patio. Un recorrido estático es un tránsito de enlace entre los costados del buque y la ubicación de transferencia terrestre. Por ejemplo, un solo remolque recoge un contenedor en una grúa de descarga del muelle y lo entrega a un área asignada para la pila de contenedores descargados. Finalmente regresa a la grúa de muelle. El uso de un remolque es mucho más flexible en un recorrido dinámico que mover el remolque a una grúa de muelle de descarga diferente a la anterior o a un área de stacking de contenedores de exportación con el fin de transportar un contenedor para una grúa de carga del muelle (Stahlbock y Voß, 2008).

3.4. Gestión en la Recepción de Camiones

Recientemente se han realizado muchas investigaciones en la gestión de la recepción del camión. Los métodos que se han aplicado para aliviar la congestión del terminal son:

- Citación de camiones
- Embarque con ventanas de tiempo (VDTW)
- Política de tarifas.

Desde la primera aplicación del método de asignación de camiones en el puerto de Vancouver, los investigadores intentaron analizar sus efectos. Pej. Zhao y Goodchild (2010) encontraron que la información obtenida del sistema de citación del camión puede disminuir la tasa de re-manipulación en los patios; Namboothiria y Erera (2008) desarrollaron un modelo de planificación y análisis del efecto del método de citas en la programación de camión; Huynh y Walton (2008) Análisis del efecto de la administración de camión en el "turn time" del camión utilizando un modelo de simulación. En la práctica, el efecto del método de citas varía de un puerto a otro. La investigación muestra que el puerto de Vancouver tiene un gran efecto mientras que el puerto de Los Ángeles, y Long Beach no funcionó (Giuliano y O'Brien, 2007)(Zhang et al., 2013).

Por otra parte, algunos estudios se centran en el diseño y la implementación del método para establecer un sistema de citas. Huynh y Walton (2008) estimaron que el número máximo de camiones que el terminal podría permitir debe tener en cuenta la eficiencia operativa del terminal. Guan y Liu (2009) calcularon la longitud de la cola de camiones sobre la base de la teoría de colas $M / Ek / c$, y diseñaron un modelo para optimizar el tiempo de citación. Muchos estudios estiman la longitud de la cola basados en la teoría de colas estacionaria, pero no pueden presentar la característica de la llegada del camión. Para resolver el problema, algunos estudios describen la cola del camión utilizando la teoría de puesta en cola no estacionario (Chen, 2011). Sin embargo, el parámetro de distribución de la llegada del camión es digno de estudio adicional (Zhang et al., 2013).

VDTW (Vessel Dependent Time Windows) es un método típico de gestión de camiones en China. VDTW fija la entrega en ventanas de tiempo para los buques de carga y descarga. Pocos estudios han diseñado un modelo de optimización para fijar las ventanas de tiempo de los camiones y contenedores que entren y salgan del puerto para cada buque (Chen, 2013). Este modelo no sólo puede aliviar la congestión del terminal, sino también disminuir la tasa de re-manipulación en el patio. Pero tiene una limitación en el tiempo de entrega de los contenedores, lo que lleva a una menor flexibilidad y satisfacción del cliente. Por lo que los puertos que utilizan VDTW están considerando un método de citación de camiones (Zhang et al., 2013).

Otro método que se utiliza en la gestión de terminales es crear una política de tarifas. Se fija una tarifa adicional a los camiones que lleguen en periodos peak, así se logra una reducción del número de camiones en ese periodo. Puertos en Los Ángeles y Singapur han puesto en práctica este método. Giuliano y O'Brien (2008) encuentran que la aplicación de la política de tarifas en los puertos de Los Ángeles y Long Beach ha reducido la llegada de camiones en las horas peak. Chen (2013) obtiene la llegada óptima del camión a través de modelo optimizado y da un nivel de carga a cada período de tiempo. Hay un gran número de estudios que se centran en aranceles de las carreteras. Pero el problema del tráfico portuario es diferente de la carretera (Yang, 2010). El diseño de la política de tarifas en base a la llegada del camión es digno de más estudios (Zhang et al., 2013).

3.5. Teoría de Colas

En general no nos gusta esperar. Sin embargo, la reducción del tiempo de espera por lo general requiere inversiones adicionales. Para decidir si invertir o no, es importante conocer el efecto de la inversión en el tiempo de espera. La teoría de colas permite modelar y analizar situaciones donde hay tiempos de espera. Las principales áreas de aplicación de la teoría de colas son los sistemas de producción, sistemas de transporte y almacenamiento, sistemas de comunicación y sistemas de procesamiento de información. Los modelos de colas son particularmente útiles para el diseño de estos sistemas en términos de layout, capacidad

y control. (Resing, 2001)

La teoría de colas es un estudio, dentro del campo de la investigación de operaciones, que se utiliza para analizar los sistemas de las líneas de espera, principalmente empresariales, y así obtener sustanciales mejoras en ellos. Tiene una gran aplicación en el área de los servicios. Dentro de las características más importantes se puede afirmar que la teoría de colas sirve para evaluar los tiempos de espera de clientes, mientras aguardan su momento, esperando su turno. Además se evalúa, en promedio, lo que se tarda en recibir el servicio. También se busca calcular el número promedio de clientes en espera en la cola, y el tamaño promedio de solicitantes de servicio en el sistema. Dentro del campo estocástico, se busca adicionalmente calcular la probabilidad de que haya un determinado número de clientes dentro del sistema, la probabilidad al momento de un cliente nuevo llegar, la probabilidad de tener esperar, etc. Con todos estos indicadores, y el afán de mejorar la calidad del servicio, enfocada en reducir los tiempos de espera de los clientes, ésta calcula el número de personas (servidores) que pueden atender simultáneamente a clientes. Obviamente el número de servidores incrementa los costos al negocio, por lo que el análisis de costos al negocio, por lo que el análisis de costos también es una parte integral de este campo de estudio.

3.6. Características de un sistema de colas.

La notación de Kendall es el sistema estándar que se utiliza para describir y clasificar un nodo dentro de una cola. D. G. Kendall propuso describir modelos de colas utilizando tres factores escritas $A / S / c$ en 1953 (Kendall, 1953), donde A representa el tiempo entre llegadas a la cola, S el tiempo de servicio y c el número de servidores en el nodo. Desde entonces se ha extendido a $A / S / C / K / N / D$ donde K es la capacidad de la cola, D es la disciplina de colas (Miller Lee, 1966) y N es el tamaño de la población de puestos de trabajo para ser servido. (Taha, 1968) (Sen, 2010) Cuando no se especifican los tres parámetros finales (por ejemplo, $M / M / 1$ cola), se supone $K = \infty$, $N = \infty$ y $D = \text{FIFO}$. (Gautam, 2007)



Notación	Característica	Símbolo	Descripción
A	Distribución del tiempo entre llegadas	M	Exponencial
S	Distribución del tiempo de servicio	D	Determinista
		G	General
c	Número de servidores	1,2,... ∞	El infinito se asume por omisión
K	Número máximo de clientes en el sistema		
N	Número de clientes en la población		
D	Disciplina de cola	FIFO	Primero en llegar primero en ser atendido (se asume por omisión)
		LIFO	Último en llegar primero en ser atendido
		RSS	Selección aleatoria de servicio
		GD	Disciplina general

Figura 3.1: Notación de Kendall

4 | Análisis del Problema

4.1. Descripción Terminal

El Puerto San Antonio es el principal puerto de Chile, ubicado en la zona central, siendo el terminal portuario más cercano a Santiago, la capital del país. Su área de influencia está conformada por Chile central y la provincia de Mendoza, en Argentina. Dentro de Chile abarca las regiones Metropolitana, Quinta y Sexta, alcanzando incluso zonas de las regiones Cuarta y Séptima. A esta área total debe sumarse una alta proporción de las cargas del sur de Chile, que son transbordadas en operaciones de cabotaje a servicios de ultramar en este puerto para alcanzar sus destinos internacionales. Mención aparte merece el comercio internacional marítimo con Argentina, el que se realiza, en un 60 %, a través de Puerto San Antonio. El Puerto de San Antonio es administrado por la Empresa Portuaria de San Antonio (EPSA). EPSA cuenta actualmente con cuatro terminales concesionados:

1. Terminal STI, con los sitios 1, 2 y 3.
2. Terminal Puerto Central, con los sitios 4, 5, 6 y 7.
3. Terminal Puerto Panul, con el sitio 8.

STI se desenvuelve dentro del sector marítimo portuario, atendiendo a las empresas navieras y a los exportadores e importadores nacionales, principalmente relacionados a la minería, sector hortofrutícola, forestal, granelero y vitivinícola entre otros. Dentro de sus clientes se encuentran las principales líneas navieras y empresas exportadoras e importadores del País. Los competidores que enfrenta STI en San Antonio, son Puerto Central S.A., sociedad que inició sus operaciones el 7 de noviembre de 2011 en el sector espigón del Puerto de San Antonio y la Terminal Norte concesionada por Puerto Panul S.A. A nivel regional, también compete con los otros puertos privados o fiscales que operan en la Región de Valparaíso como el Terminal Pacífico Sur (TPS) y Empresa Portuaria Valparaíso (EPV).

Durante el año 2015 STI transfirió 12.909.377 millones de toneladas, lo que equivale a un 38 % de participación en el mercado regional. En términos de volumen de contenedores STI transfirió 704.338 boxes, lo que equivale a un 56 % de participación en el mercado regional. STI ha continuado con su posición de

liderazgo tecnológico, en la búsqueda de la optimización de los procesos internos y la seguridad, así como a la facilitación de las tareas de sus usuarios vía internet.

Durante 2009 se consolidaron proyectos como la visación electrónica de cargas de importación y exportación, ahora además en tiempo real con los sistemas de Aduanas, logrando reducir considerablemente los tiempos de recepción de ésta a menos de 30 minutos. Esto permitió el inicio durante el año 2009 de la Garantía explícita de tiempo de atención para cargas de importación y exportación en contenedores denominada “Máxima 60”, que es un compromiso de parte de STI de pagar por la espera superior a 60 minutos en el proceso de recepción y despacho de contenedores. Garantía única e innovadora en la industria portuaria mundial.

STI está comprometido con la comunidad y tiene políticas de sostenibilidad, entre otras:

1. Desarrollo local: Participar activamente en el desarrollo de la comuna de San Antonio, promoviendo la calidad de vida de la comunidad y la relación Ciudad-Puerto.
2. Producción limpia: Asumir y promover la protección al medio ambiente, a través de prácticas de eficiencia energética, tratamiento y disposición final de residuos industriales y uso de las mejores tecnologías disponibles que contribuyan a la disminución de gases de efecto invernadero, respondiendo así a los compromisos país sobre estas materias.

4.1.1. Demanda

La capacidad de los buques se ha multiplicado en los últimos 50 años. Las razones de esta evolución se encuentran en la necesidad de reducir costos de transporte, de hacer frente a la dependencia y variabilidad de los precios del petróleo, así como a las exigencias de reducir los consumos para disminuir los efectos del cambio climático. Frente a una mayor demanda, ha sido necesario elevar la capacidad de transporte para aprovechar economías de escala, disminuyendo el número de viajes y mejorando la calidad del combustible. El concepto más moderno de este tipo de nave son los llamados modelos ‘Triple E’: eficientes económicamente (menor costo unitario de transporte); eficientes energéticamente (menor consumo de combustible por unidad transportada) y eficientes ecológicamente (menores emisiones).

En la figura 4.1 se puede ver la evolución de los buques de carga en los últimos 50 años.

La figura 4.2 muestra la demanda en la transferencia de carga de contenedores en los años 2015 y 2016. La demanda ha crecido respecto al año 2015, donde hubo máximos de demanda en los meses Marzo, Mayo, Agosto y Octubre. Mientras que en el año 2016 la temporada alta se ha mantenido casi todo el año con máximo de Marzo a Julio y Octubre.

En la figura 4.3 se muestra la demanda proyectada para el año 2030, la cual duplica la demanda actual.

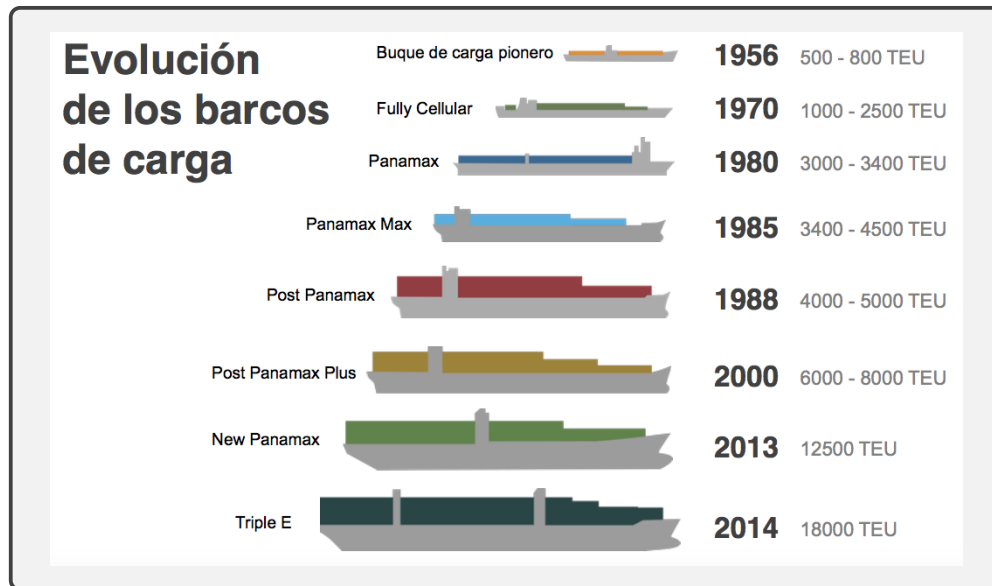


Figura 4.1: Evolución Capacidad Barcos
(Fuente: Subsecretaría Transporte)

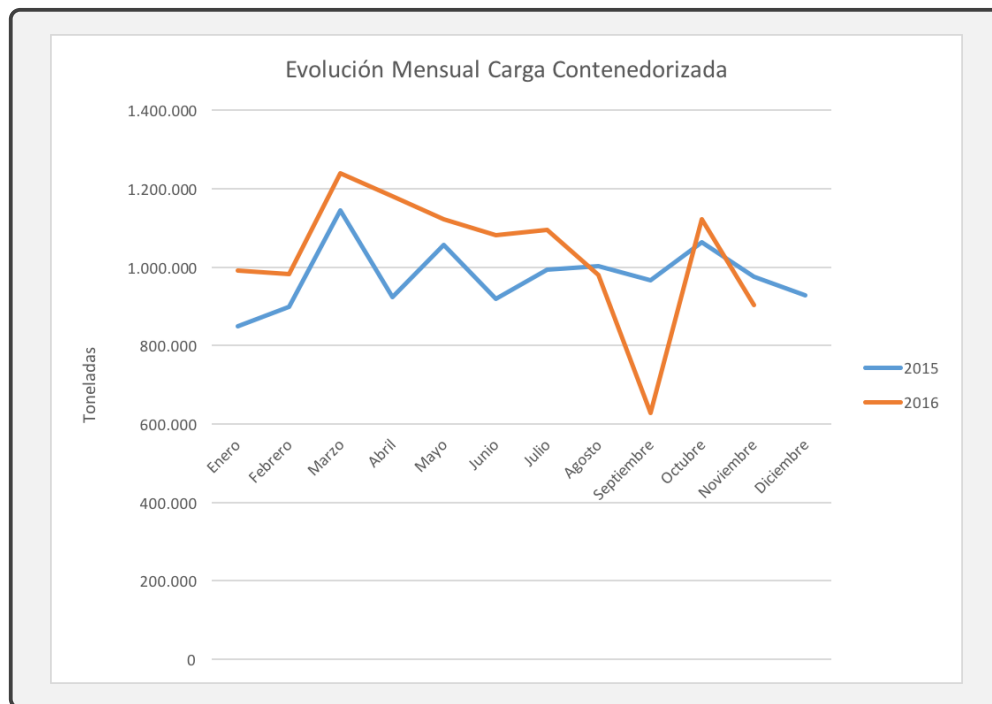


Figura 4.2: Evolución mensual carga contenedorizada
(Fuente: Estadísticas EPSA)

La capacidad actual no daría abasto para satisfacer la demanda proyectada al año 2030, por lo que se planean diversas obras para aumentar la capacidad en el puerto de San Antonio, de acuerdo al plan de desarrollo portuario desarrollado por el ministerio de transporte el año 2013.

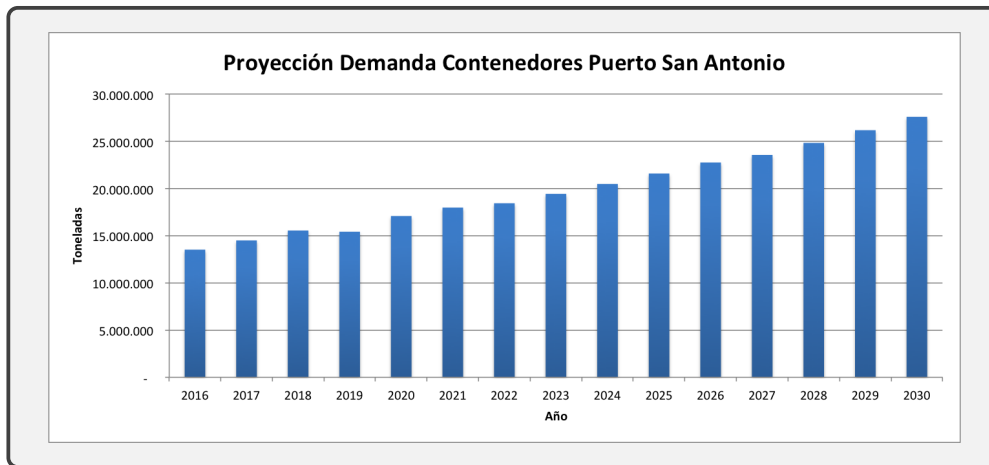


Figura 4.3: Proyección Demanda
(Fuente: Estadísticas Transporte)

4.2. Descripción Proceso Recepción de Contenedores Vacíos

El proceso de recepción de contenedores vacíos se produce cuando un armador necesita trasladar contenedores vacíos desde un puerto a otro. Antes que una nave arribe en el terminal, para embarcar carga, la naviera envía una solicitud con los contenedores vacíos requeridos para cada nave. STI trabaja con 5 depósitos ubicados en distintas localidades en San Antonio. El terminal coordina con el Depósito de contenedores del armador los días y turnos donde se recibirán los contenedores. Cada depósito trabaja con un transportista que enviará una cantidad de camiones para que trasladen los contenedores desde el Depósito al Terminal, los camiones repiten en recorrido depósito-terminal tantas veces como sea necesario hasta completar la cantidad de contenedores vacíos asignada. El depósito de contenedores trabaja en horas hábiles, por lo que los contenedores son enviados principalmente en los turnos 1 y 2.

4.2.1. Pre Gate

Todos los camiones deben pasar por un pre gate donde se revisa si el contenedor está autorizado para embarcar, se digita el contenedor a través de un terminal de radio frecuencia y se verifica el estado de la orden de embarque. Si el camión se encuentra con la documentación visada puede continuar en dirección al terminal, de lo contrario debe dirigirse a la zona de parqueo (Nodo logístico puerto san antonio).

4.2.2. Inspección y Recepción

En el terminal existen 5 pórticos para el ingreso de camiones de los cuales uno se asigna para la recepción de contenedores vacíos. En el pórtico se realiza una inspección de daños del contenedor y la

revisión de la documentación. Además se le indica la zona del patio donde debe dirigirse. La zona se asigna por Nave-Puerto-Tipo Contenedor (20 o 40 pies)

4.2.3. Acopio y Despacho

Se asigna una grúa de patio, la cual espera en la zona asignada. La grúa descarga el contenedor y lo apila en el bay asignado (Ilustración 7). Una vez que la grúa toma al contenedor y lo apila el camión se retira del terminal y la grúa continúa con el camión siguiente. Actualmente STI posee 3 grúas porta contenedores para los vacíos.

Actualmente no existe restricción de un número máximo en la fila de camiones de vacíos dentro del terminal, pero en la temporada alta cuando existe congestión se cierra el pórtico de entrada hasta descongestionar el terminal. Esto traslada la fila de camiones a la entrada del terminal.

4.2.4. Descripción Zonas Recepción Contenedores Vacíos

En la Figura 4.4 se muestran las áreas cercanas al terminal y que participan en el proceso de recepción de contenedores vacíos:



Figura 4.4: Áreas cercanas al terminal que participan del proceso

(Fuente: Elaboración Propia)

1. Zona Parqueo: EPSA (Empresa Portuaria de San Antonio) habilitó una Truck Center con dos objetivos principales: ayudar a organizar los flujos vehiculares hacia el puerto y contribuir a eliminar los camiones estacionados en las vías de acceso, liberando capacidad vial en la red aledaña y mejorando los niveles

de servicio de los accesos al puerto. Esta zona de parqueo de camiones se encuentra ubicada a un costado de STI. Uno de los objetivos de esta zona es para que los camiones esperen mientras es visado el contenedor.

2. Rotonda: Zona donde se realiza un pre chequeo de la documentación del contenedor.
3. Pórtico: Zona donde se realiza el ingreso del contenedor. Existen 5 pórticos en STI de los cuales uno se encuentra habilitado para los contenedores vacíos.
4. Áreas Acopio Contenedores Vacíos: El patio se encuentra dividido en yardas, las cuales se encuentran predeterminadas para los distintos tipos de carga (Reefer, Dry/Mty, IMO) (Ver Figuras 4.7 y 4.8) . Cada yarda está dividida en Bay (Largo), Row (Ancho) y Tier (Alto), donde los contenedores son apilados (Ver Figura 4.5). La capacidad de cada yarda está dada por su volumen, generalmente expresado en TEU (Ver Tabla 4.1).

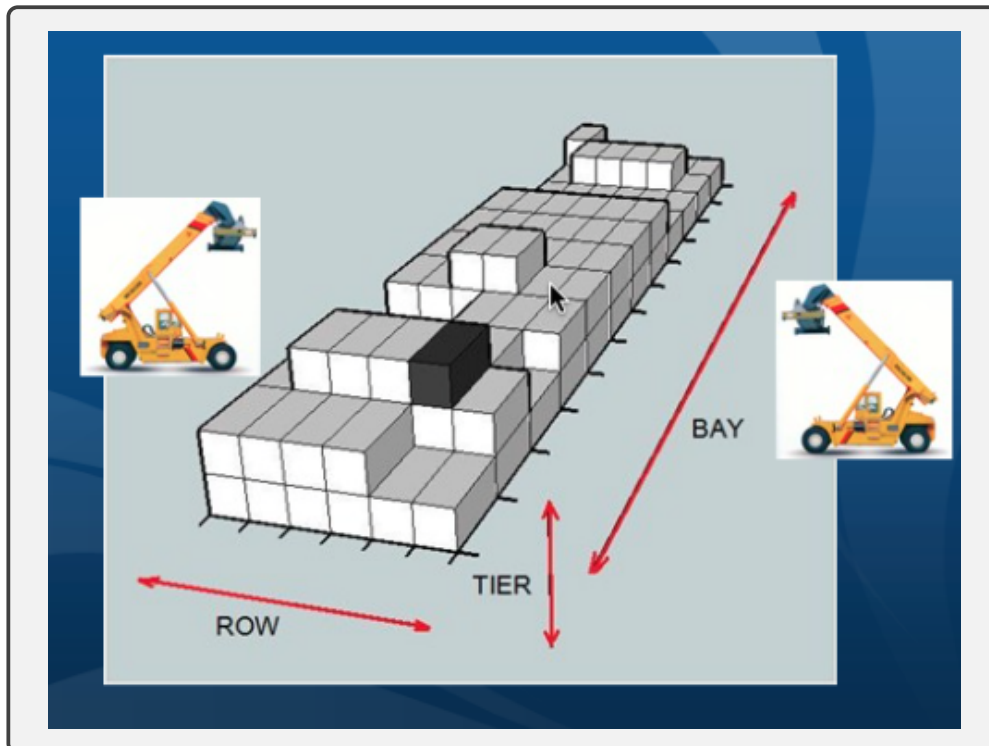


Figura 4.5: Baroti

En la Figura 4.7 y la Figura 4.8 se muestra el Layout del terminal STI. Se puede ver la distribución de las yardas dentro del terminal.



Figura 4.6: Grúa de Patio Contenedores Vacíos

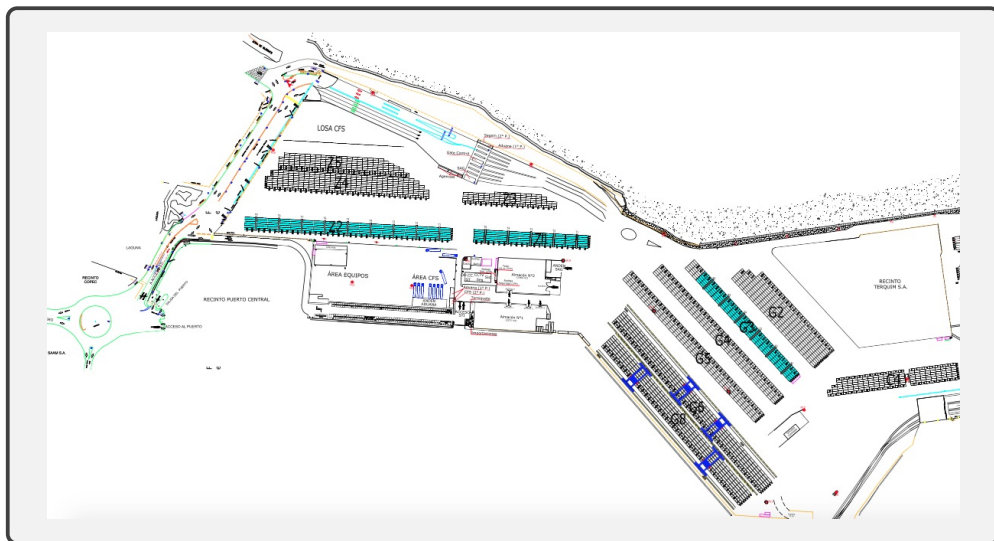
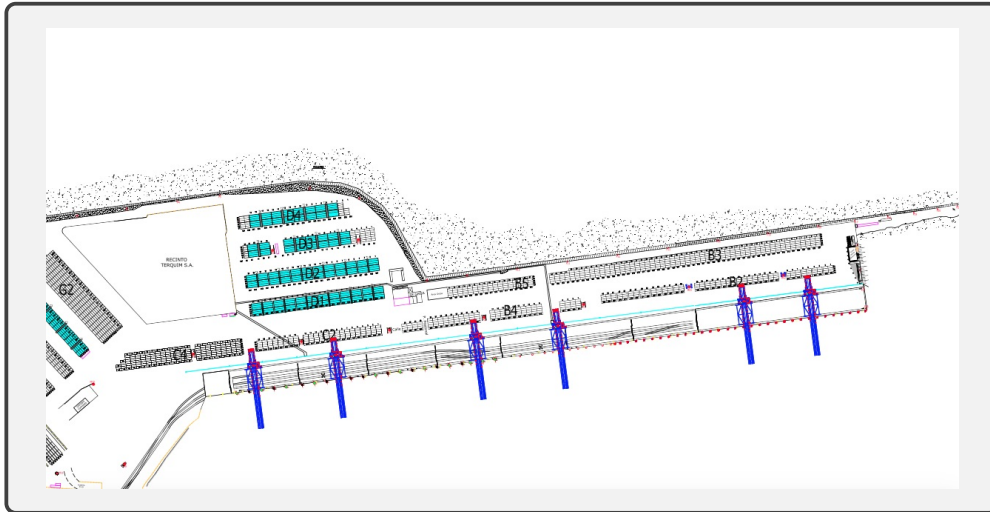


Figura 4.7: Plano Terminal Parte 1
(Fuente: Elaboración Propia)

La tabla muestra las yardas asignadas para stacking de carga Dry y de contenedores vacíos, también se muestra la capacidad de cada yarda medida en TEU.

**Figura 4.8:** Plano Terminal Parte 2

(Fuente: Elaboración Propia)

Carga DRY-Empty			
Yarda	TEU	Yarda	TEU
B3	1500	G2+	757
B4	619	G3-	126
B5	408	G3+	142
C2	611	G4	1024
C4	857	G5	973
D3+	42	G6	1416
D5-	75	G7	480
D5+	84	G8	1136
D6-	56	Z3	445
D6+	56	Z4	1271
G2-	552	Z5	1037

Tabla 4.1: Distribución de yardas dentro del terminal

5 | Formulación Modelo

A continuación se presenta el procedimiento que se usará para solucionar el problema planteado en la memoria:

1. Representación del proceso de contenedores vacíos a través de un Grafo $G(N, A)$.
2. Cálculo de la demanda sobre cada nodo de la red, utilizando Teorema de Jackson.
3. Determinar el número de servidores en cada nodo de la red de tal forma que la red este en estado estable, es decir que la cola se produce por variabilidad de los tiempos entre llegadas y no por falta de capacidad promedio.
4. Determinar el número y tiempo esperado de camiones en cola en cada nodo de la red.

5.1. Red de Proceso

La red del proceso se describe a través de un grafo $G(N, A)$ donde:

N : Conjunto de Nodos

A : Conjunto de Arcos

$D(i)$: Conjunto Indexado donde $D(i) = \{j \in N : (i, j) \in A\}$

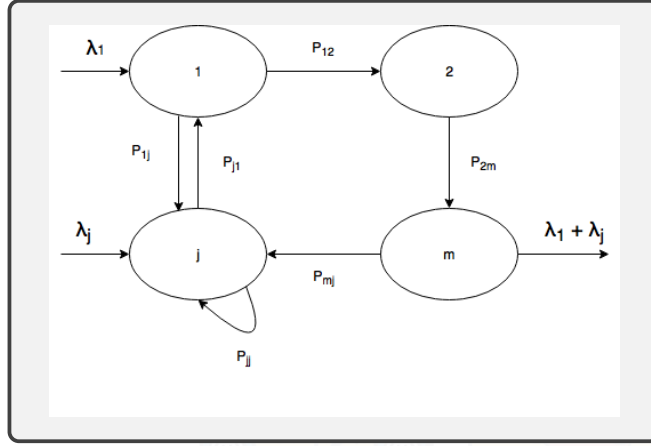
La figura 6.1 corresponde a un proceso de servicio representado a través de un grafo. El objetivo de esta figura es ilustrar los parámetros de la red.

5.2. Parámetros

Los parámetros que serán usados en el modelo son los siguientes:

Note que el coeficiente cuadrado de variación de una variable aleatoria x es:

$$C_v^2 = \frac{Var(x)}{(\mathbb{E}(x))^2} \quad (5.1)$$

**Figura 5.1:** Representación de un proceso de servicio a través de un Grafo

Parámetros	
Parámetro	Definición
λ_i	Tasa de entrada promedio.
$\mathbb{P}_{ij}$	Probabilidad que el cliente pase del nodo i al nodo j .
μ_i	Capacidad de la máquina o servidor del nodo.
C_{si}^2	Coficiente cuadrado de variación del tiempo de proceso i , indica el nivel de automatización de un proceso.
C_{λ}^2	Coficiente cuadrado de variación de la tasa de entrada promedio.

Tabla 5.1: Parámetros a utilizar en el modelo

Donde $Var(x)$ es la varianza de x y $\mathbb{E}(x)$ es la esperanza de x .

5.3. Entradas netas

Para determinar la demanda sobre cada uno de los procesos, se utiliza el teorema de Jakson para redes abiertas. Este teorema permite determinar la entrada neta a la estación i , (α_i) . La salida neta al proceso i es igual a las entradas externas a la estación i (λ_i) más la suma de todas las entradas a la estación i de estaciones alimentadoras.

$$\alpha_i = \lambda_i + \sum_{j \in D(i)} \alpha_j \mathbb{P}_{ji} \quad \forall i \in N \quad (5.2)$$

5.4. Capacidad nodo en estado estable

Para que el sistema se encuentre en estado estable se debe calcular el número de servidores necesarios en cada nodo, de modo que la capacidad de cada nodo sea mayor a la demanda. Esto asegura que la cola

se formará solo por variabilidad en el tiempo entre llegadas los camiones y no por falta de capacidad promedio.

Sea S_i el número de servidores en paralelo en el proceso i , para que el proceso esté en estado estable.

Luego:

$$S_i \geq \frac{\alpha_i}{\mu_i} \quad \forall i \in N \quad (5.3)$$

Note que la utilización del nodo i , ρ_i :

$$\rho_i = \frac{\alpha_i}{S_i \mu_i} \quad \forall i \in N \quad (5.4)$$

Como $S_i \in \mathbb{Z}^+$, entonces:

$$S_i = \left\lceil \frac{\alpha_i}{\mu_i} \right\rceil \quad \forall i \in N \quad (5.5)$$

5.5. Coeficiente cuadrado de variación del tiempo entre llegadas

Sea C_{ai}^2 el coeficiente cuadrado de variación del tiempo entre llegadas, donde:

$$C_{ai}^2 = \frac{\lambda_i}{\alpha_i} C_{\lambda}^2 + \sum_{j \in D} P_{ji} \frac{\alpha_j}{\alpha_i} (C_{aj}^2 (1 - \rho_j^2) + C_{sj}^2 \rho_j^2) , \quad \forall i \in N \quad (5.6)$$

5.6. Parámetros de interés

Los parámetros de interés que se utilizarán en este modelo son:

L_{qi} : Número esperado de unidades en la fila para un nodo i , $\forall i \in N$

W_{qi} : Tiempo esperado en la fila para un nodo i , $\forall i \in N$

Se considerarán los casos para uno o varios servidores, utilizando notación de kendall:

Para $S_i = 1$: (G/G/1)(∞/∞)

$$L_{qi} = \frac{\rho_i^2}{2(1 - \rho_i)} (C_{ai}^2 + C_{si}^2) k \quad (5.7)$$

Donde k puede tomar los siguientes valores dependiendo de C_{ai}^2 :

$$k = e^{-\left[\frac{2(1-\rho_i)(1-C_{ai}^2)^2}{3\rho_i(C_{ai}^2 + C_{si}^2)} \right]} \quad \text{si } C_{ai}^2 < 1 \quad (5.8)$$

$$k = 1 \quad \text{si } C_{ai}^2 = 1 \quad (5.9)$$

$$k = e^{-\left[\frac{(1-\rho_i)(C_{ai}^2 - 1)^2}{(C_{ai}^2 + 4C_{si}^2)} \right]} \quad \text{si } C_{ai}^2 > 1 \quad (5.10)$$

Para $S_i > 1$: (G/G/S)(∞/∞)

$$L_{qi} = \left(\frac{\alpha^s}{\mu^s S!} \right) \left(\frac{\rho}{(1-\rho)^2} \right) \left(\frac{C_a^2 + C_s^2}{2} \right) P_0 k \quad (5.11)$$

k se calcula de acuerdo a las fórmulas indicadas anteriormente, fórmulas 5.8, 5.9 y 5.10.

$$P_0 = \left[\frac{(S\rho)^s}{S!(1-\rho)} + \sum_{n=0}^{s-1} \frac{(S\rho)^n}{n!} \right]^{-1} \quad (5.12)$$

Una vez que ya se tiene L_{qi} se puede calcular W_{qi}

$$W_q = \frac{L_q}{\alpha} \quad (5.13)$$

6 | Implementación

A continuación se implementará el modelo planteado en el capítulo anterior para el problema que se desea resolver en esta memoria.

El proceso de ingreso de contenedores vacíos puede ser visto como un sistema que cuenta con los siguientes nodos:

- Nodo 1: Pre chequeo, revisión visual de la documentación del camión antes que entre al puerto.
- Nodo 2: Parqueo, Espera del camión en un área fuera del puerto mientras regula su documentación.
- Nodo 3: Ingreso e inspección, Paso del camión por el pórtico de entrada del puerto e inspección visual contenedor.
- Nodo 4: Acopio y despacho, Acopio del contenedor realizado por una grúa de patio en el terminal.

Para ver mas detalles del sistema y sus nodos puede dirigirse al Capítulo 4, sección 4.2.

6.1. Sistema Despacho Contenedores Vacíos

6.1.1. Red del Proceso

- Los camiones llegan directamente al nodo 1.
- Del nodo 1 el camión puede pasar al nodo 2 o al nodo 3.
- Los camiones que entran al nodo 2 deben volver al nodo 1.
- Todos los camiones que ingresan al nodo 3 pasan al nodo 4.

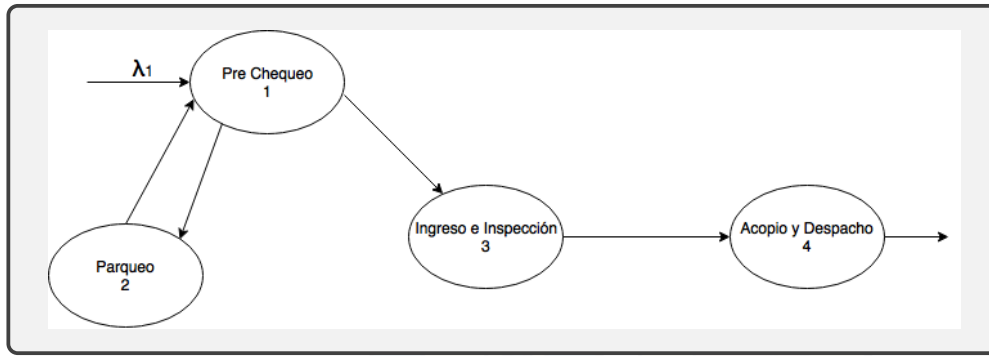


Figura 6.1: Grafo Escenario con 4 nodos

6.1.2. Parámetros

6.1.2.1. Tasa de Entrada Promedio

Para calcular la tasa de entrada promedio (λ) se analizarán las llegadas de camiones por hora en el mes de Febrero (2016), el cual es uno de los meses de temporada alta para el ingreso de contenedores vacíos. Se realizó un histograma para analizar la cantidad de camiones que llega durante una hora y su frecuencia. En la tabla 6.1 se muestran los datos obtenidos durante el mes de Febrero, se puede apreciar que un 19,3 % de las veces llegan entre 0 y 11 camiones, un 22,9 % llegan entre 11 y 22 camiones, etc. Se tratará de cubrir al menos el 80 % de las frecuencias de llegadas por lo que se tomará el valor $\lambda = 55$ donde se cubre un 88 % de la frecuencia acumulada.

Desde	Hasta	Frecuencia Relativa	Frecuencia Acumulada
-	11	19,3 %	19,3 %
11	22	22,9 %	42,2 %
22	33	20,5 %	62,7 %
33	44	14,5 %	77,1 %
44	55	11,2 %	88,4 %
55	66	3,6 %	92,0 %
66	77	5,2 %	97,2 %
77	88	1,2 %	98,4 %
88	99	0,4 %	98,8 %
99	110	1,2 %	100,0 %

Tabla 6.1: Histograma para la llegada de Camiones

Se puede apreciar en la figura 6.2 que en el 88 % de los casos llegan menos de 55 camiones durante una hora. Por lo que se trabajará con este valor para analizar el comportamiento del sistema de redes ($\lambda = 55$).

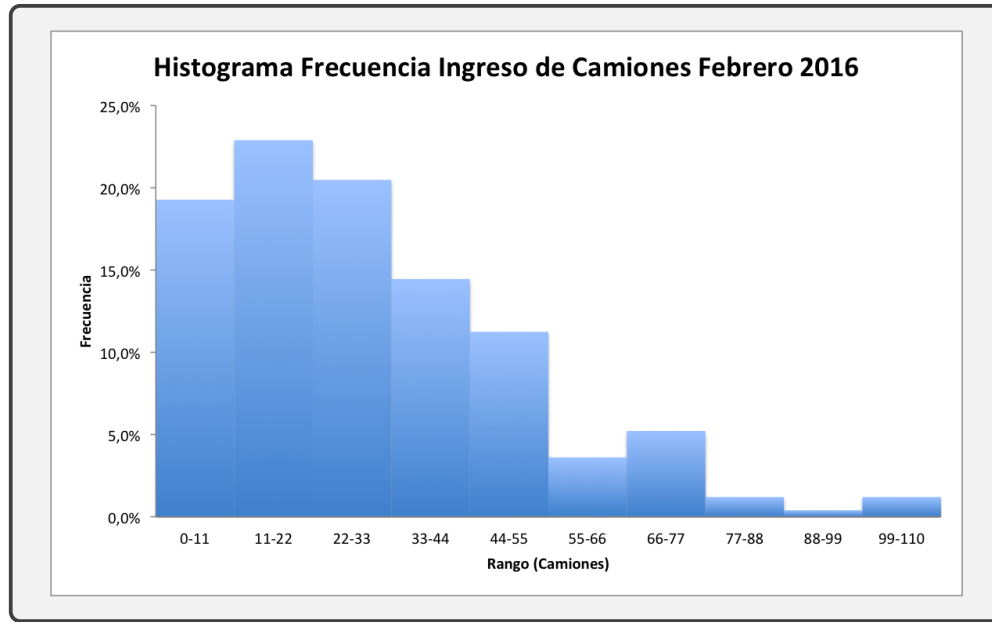


Figura 6.2: Histograma para la llegada de contenedores por hora
(Fuente: Elaboración Propia)

6.1.2.2. Probabilidad que el cliente pase del nodo i al nodo j

En la figura 6.3 se muestra la proporción de camiones que entra a cada nodo, la información se obtuvo en entrevistas con expertos en operaciones de STI. De acuerdo a los expertos un 80 % de los camiones pasa del nodo pre-chequeo al nodo ingreso, mientras que el 20 % pasa al nodo parqueo. Para el resto de los nodos se asume que pasan el 100 % de camiones al nodo siguiente.

6.1.2.3. Capacidad servidor de cada nodo

Mediante entrevista con expertos y observación del proceso se obtienen los tiempos de proceso de cada nodo con un servidor. Con el tiempo de proceso se puede calcular la capacidad de cada servidor del nodo (camiones/hora), ver Tabla 6.2.

Nodo i	Capacidad (Cam/Hora) μ_i	Tiempo de Proceso(Hora)		
		Media	Máx.	Mín
1	131,580	0,0076	0,0042	0,0111
2	357,140	0,0028	0,0028	0,0028
3	51,550	0,0194	0,0139	0,0250
4	42,370	0,0236	0,0194	0,0278

Tabla 6.2: Capacidad y Tiempo de Proceso de cada nodo con un servidor

6.1.2.4. Coeficiente cuadrado de variación del tiempo de proceso

Sea

$$C_{si}^2 = \frac{V(t)}{[E(t)]^2}, \forall i \in N \quad (6.1)$$

El coeficiente cuadrado de variación del tiempo de proceso se define como la varianza del tiempo de proceso para el nodo i dividido por la esperanza del tiempo del proceso del nodo i al cuadrado.

Para calcular C_{si}^2 se midieron los tiempos de proceso de cada nodo, calculando su varianza, promedio, de acuerdo a la tabla 6.3.

Nodo	i	Varianza	Promedio	C_{si}^2
Pregate	1	54,89	27,52	0,07
Parqueo	2	0,00	10,00	0,00
Ingreso	3	140,03	69,99	0,03
Acopio	4	79,86	85,01	0,01

Tabla 6.3: Coeficiente cuadrado de variación del tiempo de proceso

6.1.2.5. Coeficiente cuadrado de variación de la tasa de entrada promedio

Sea

$$C_{\lambda_1}^2 = \frac{V(x)}{[E(x)]^2}, \quad x: \text{tasa de entrada promedio} \quad (6.2)$$

El coeficiente cuadrado de variación de la tasa de entrada promedio se define como la varianza de la tasa de entrada promedio dividido por la esperanza de la tasa de entrada promedio al cuadrado.

Para calcular $C_{\lambda_1}^2$ se tomó como muestra el mes de Febrero del año 2016, durante las 09:00 y 19:00 Hrs. Se obtuvo los siguientes datos:

- Varianza = 0,030
- Promedio = 0,064
- $C_{\lambda_1}^2 \simeq 7$

6.1.3. Entradas Netas

De acuerdo al teorema de Jackson (Ver Capítulo 5, Ecuación (5.2)) se obtienen las siguientes ecuaciones de balance (Ver figura 6.3).

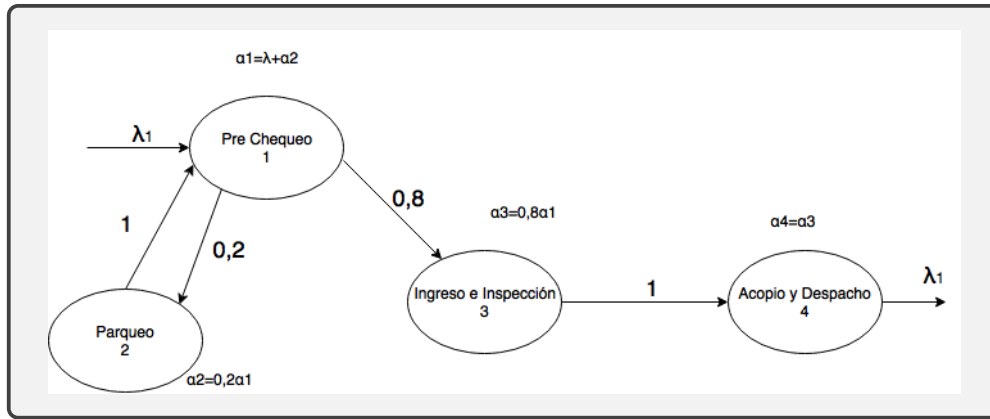


Figura 6.3: Ecuaciones de Balance

$$\alpha_1 = \lambda_1 + \alpha_2$$

$$\alpha_2 = 0,2\alpha_1$$

$$\alpha_3 = 0,8\alpha_1$$

$$\alpha_4 = \alpha_3$$

Al resolver las ecuaciones se encuentran los valores para la demanda de camiones por hora en cada nodo.

$$\alpha_1 = 68,75$$

$$\alpha_2 = 13,75$$

$$\alpha_3 = 55$$

$$\alpha_4 = 55$$

6.1.4. Capacidad Nodo en Estado Estable

En la sección anterior se calculó la demanda de camiones en cada nodo. Ahora se calculará la capacidad promedio que necesita cada nodo para satisfacer la demanda promedio. Véase Capítulo 5, Sección 5.4. De acuerdo a la ecuación (5.5) se calcula S_i :

Cálculo de servidores por nodo								
Nodo	i	λ_i	α_i	P	μ_i	S_i	$S_i \mu_i$	ρ_i
Pregate	1	55	68,75	1	131,58	1	131,58	52 %
Parqueo	2	0	13,75	0,2	357,14	1	357,14	4 %
Ingreso	3	0	55	0,8	51,55	2	103,10	53 %
Acopio	4	0	55	1	42,37	2	84,74	65 %

Tabla 6.4: Cálculo de servidores por nodo

6.1.5. Coeficiente cuadrado de variación del tiempo entre llegadas

Para el cálculo de C_{ai}^2 se aplican para cada nodo la ecuación (5.6), obteniendo los siguientes resultados:

$$C_{a1}^2 = \frac{\lambda_1}{\alpha_1} C_{a1}^2 + P_{21} \frac{\alpha_2}{\alpha_1} (C_{a2}^2 (1 - \rho_2^2) + C_{s2}^2 \rho_2^2)$$

$$C_{a2}^2 = P_{12} \frac{\alpha_1}{\alpha_2} (C_{a1}^2 (1 - \rho_1^2) + C_{s1}^2 \rho_1^2)$$

$$C_{a3}^2 = P_{13} \frac{\alpha_1}{\alpha_3} (C_{a1}^2 (1 - \rho_1^2) + C_{s1}^2 \rho_1^2)$$

$$C_{a4}^2 = P_{34} \frac{\alpha_3}{\alpha_4} (C_{a3}^2 (1 - \rho_3^2) + C_{s3}^2 \rho_3^2)$$

$$C_{a1}^2 = 6,56$$

$$C_{a2}^2 = 4,79$$

$$C_{a3}^2 = 4,79$$

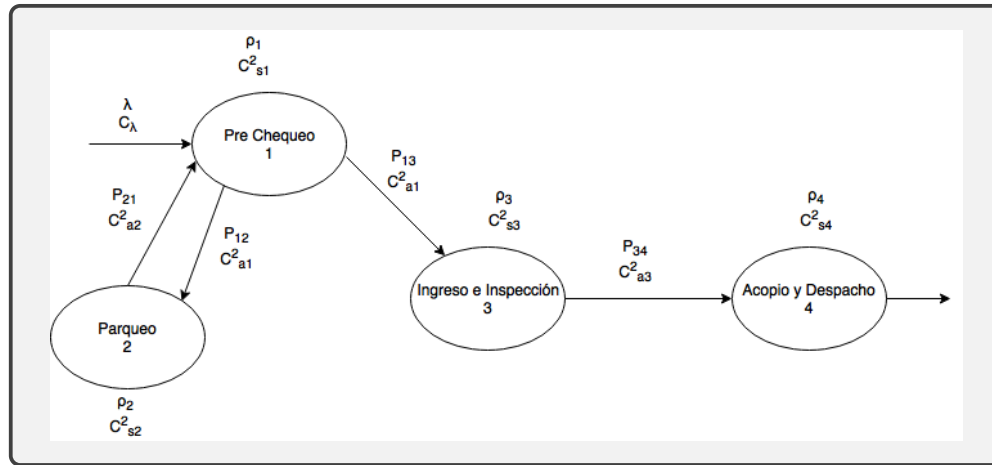
$$C_{a4}^2 = 3,43$$

En la figura 6.4 se muestra la variabilidad de cada nodo (C_{si}^2) y cómo se forma la variabilidad en los arcos (C_{ai}^2).

6.1.6. Parámetros de Interés

El nodo 1 y nodo 2 para estar en estado estable deben contar con 1 servidor, de acuerdo a la notación de Kendall: $(G/G/1)(\infty/\infty)$.

Se calcula k, de acuerdo a ecuación (5.6), El largo de la cola se calcula de acuerdo a la ecuación (5.7).

**Figura 6.4:** Variabilidad dentro del Grafo

Los nodos 3 y 4 deben contar con 2 servidores para que el sistema se encuentre estable, lo que se utiliza la ecuación (5.11) para calcular el largo de cola en estos nodos.

A continuación se muestra un resumen de los cálculos de los parámetros de interés (Ver Tabla 6.5) obtenidos para el escenario actual, se puede ver que con una tasa promedio de entrada de camiones igual o menor que 55 y dos servidores en los nodos 3 y 4 el sistema se comporta en forma óptima. El largo de cola mas alto no supera a 1 camión y el tiempo de espera es alrededor de 1 minuto en los nodos 1,3 y 4.

Resumen Cálculo Parámetros de Interés												
Nodo	λ	α	ρ	S_i	C_λ	C_a^2	C_s^2	μ	P_0	K	L_q	W_q
1	55	68,75	52 %	1	0,96	0,90	0,07	131,58		0,116	1	0,02
2		13,75	4 %	1		0,68	0,00	357,14		0,056	1	0,07
3		55	53 %	2		0,68	0,03	103,1	30 %	0,256	1	0,02
4		55	65 %	2		0,49	0,01	84,74	21 %	0,550	1	0,02

Tabla 6.5: Resumen Cálculo Parámetros de Interés



7 | Simulación y Mejoras Complementarias

El largo de la fila de camiones se ve afectado por distintas variables como la capacidad de la grúa, el número de servidores en cada nodo, la cantidad de camiones que lleguen desde el exterior y la variabilidad en la llegada de los camiones del exterior. En este capítulo se realizará una simulación del largo de la fila para cada nodo variando la cantidad de entrada promedio de camiones (λ). Para cada nuevo valor de λ deberá aplicarse nuevamente el modelo planteado en el Capítulo 5 y realizar los cálculos.

Posteriormente se realizará una simulación modificando los valores de C_{λ}^2 , de esta forma se verá cómo se comporta el largo de la fila al disminuir la variabilidad en la llegada de los camiones del exterior. Con el λ representativo para la situación actual se calcularán los parámetros relevantes con los nuevos valores de C_{λ}^2 .

7.1. Largo de Fila para distintos λ

Se tomarán los siguientes valores para λ (llegada de camiones por hora):

λ	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
-----------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

Para cada uno de estos valores se calcularán los parámetros para que el sistema permanezca estable y se calculará el largo de fila en cada nodo.

En la tabla siguiente se muestra la cantidad de servidores ideal para cada nodo con el sistema en estado estable para cada valor de λ , la cantidad de servidores utilizados en cada nodo implicará un mayor o menor costo en la operación.

En la tabla siguiente se muestra el largo de fila de camiones para cada nodo con distintos valores de λ .

Los nodos que se ven afectados al variar λ son los nodos 3 (Ingreso) y nodo 4 (Acopio). Las tablas

Nodo	Servidores necesarios por nodo														
λ	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Pre Gate	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Parqueo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ingreso	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Acopio	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3

Tabla 7.1: Servidores necesarios para cada nodo para distintos λ , manteniendo el sistema en estado estable

Nodo	Largo Fila Variando λ														
λ	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	5	9	17	44
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	2	4	11	74	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3
4	2	5	18	1	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1	1

Tabla 7.2: Largo Fila para distintos λ

7.3 y 7.4 muestran el detalle de cada uno de estos nodos, mostrando la cantidad de servidores, el porcentaje de utilización y el largo de fila para cada λ .

Nodo 3	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Servidores	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Utilización	58 %	68 %	78 %	87 %	97 %	53 %	58 %	63 %	68 %	73 %	78 %	82 %	87 %	92 %	97 %
Largo Fila	1	2	4	11	74	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3

Tabla 7.3: Resultados para el Nodo Ingreso con distintos valores para λ

La Figura 7.1 muestra la relación entre la capacidad (cantidad de servidores en cada nodo), su utilización y el largo de la fila para el nodo Ingreso. Se puede ver que para un $\lambda = 50$, con un sólo servidor se tiene una utilización del nodo de un 97 % y la fila puede llegar a 74 camiones, esto equivale a una fila de casi 2 km de largo. Para evitar esta situación habría que incorporar un nuevo servidor alrededor de $\lambda = 45$ o regular el tiempo entre llegadas de camiones para disminuir C_{λ}^2 como se verá mas adelante.

Si se hacen los cálculos para $\lambda = 55$ el sistema necesitaría 2 servidores para estar estable, la utilización del nodo es un 53 % y el largo de la fila baja a 1 camión.

En la tabla siguiente se muestran la cantidad de servidores para que el nodo Acopio permanezca estable al ir variando λ (tasa de entrada de camiones), además se muestra la utilización del nodo y el largo de la fila.

La Figura 7.2 muestra la relación entre la capacidad (cantidad de servidores en cada nodo), su utilización y el largo de la fila para el nodo Acopio. En este nodo se produce una larga fila con un $\lambda = 40$, operando con una grúa se tiene una utilización de un 94 % y se llega a un largo de fila de 18 camiones. Al realizar los cálculos para $\lambda = 45$ el sistema debe operar con dos grúas para estar en estado estable y así disminuir el largo de la fila. Se puede ver que el sistema permanece estable con dos grúas hasta tener una llegada de 85 camiones por hora, luego de esto se deben tener 3 grúas para que no se produzcan filas.



Figura 7.1: Comportamiento en el nodo ingreso al cambiar el valor de λ

Nodo 4	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Servidores	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3
Utilización	71 %	83 %	94 %	53 %	59 %	65 %	71 %	77 %	83 %	89 %	94 %	67 %	71 %	75 %	79 %
Largo Fila	2	5	18	1	1	1	1	1	1	2	3	1	1	0	0

Tabla 7.4: Resultados para el Nodo Acopio con distintos valores para λ

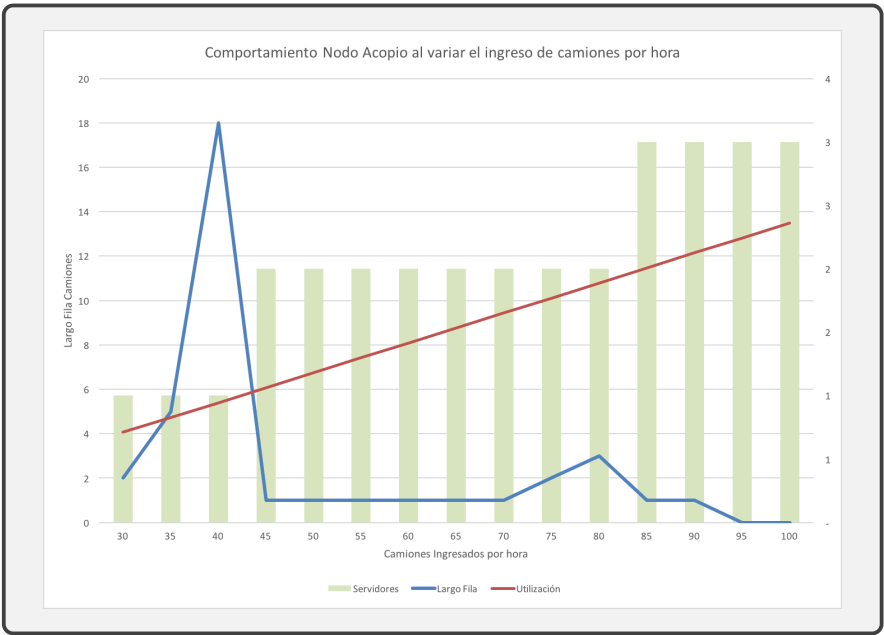


Figura 7.2: Comportamiento en el nodo acopio al cambiar el valor de λ

7.2. Largo Fila al disminuir C_λ^2

C_λ^2 representa a la variación del tiempo entre llegada de camiones, hoy en día existe una alta variabilidad en el tiempo entre llegadas, algunas veces los camiones llegan cada pocos minutos mientras que en otros periodos pueden pasar horas sin recibir camiones. En esta sección se mostrará qué pasa con el largo de la fila si se disminuye la variación del tiempo entre llegada de camiones.

Con las condiciones actuales ($C_\lambda^2 = 7$) si se quisiera mantener un sistema para un $\lambda = 50$ o menor el sistema tendría que soportar largas filas, hasta mas de 70 camiones. La siguiente tabla muestra la espera de camiones en cada nodo al disminuir C_λ^2 .

Nodo	Largo Fila					
	$C_\lambda^2=7$	$C_\lambda^2=5$	$C_\lambda^2=4$	$C_\lambda^2=2$	$C_\lambda^2=1$	$C_\lambda^2=0$
Nodo 1	1	1	1	1	1	1
Nodo 2	1	1	1	1	1	1
Nodo 3	74	55	45	24	13	1
Nodo 4	1	1	1	1	1	1

Tabla 7.5: L_q (Largo fila en cada nodo) para distintos C_λ^2

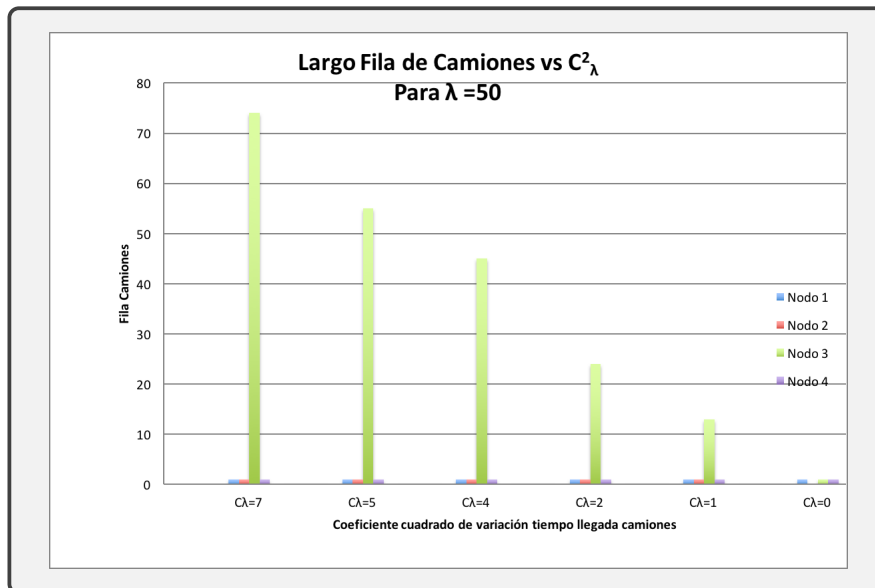


Figura 7.3: L_q para distintos C_λ^2

En el gráfico 7.3 se puede apreciar que si se logra disminuir el coeficiente cuadrado de variación de la llegada de camiones para un mismo λ disminuye el largo de la fila a medida que disminuye C_λ^2 . Para disminuir C_λ^2 una alternativa sería crear un sistema de citación de camiones, donde cada camión reciba una hora de atención de acuerdo a la capacidad del sistema, de esta forma se lograría bajar el valor de C_λ^2 .

La tabla 7.6 muestra para $\lambda = 50$ los tiempos que debe esperar un camión en ser atendido en cada nodo

al cambiar C_λ^2 . Notar que un camión deberá esperar 89 minutos en el nodo 3 (Ingreso) con las condiciones actuales, mientras que si se logra disminuir C_λ^2 a 2 el tiempo disminuye a 28 minutos y con $C_\lambda^2 = 1$ baja a 15 minutos.

Nodo	Tiempo Esperado Fila (Horas)					
	$C_\lambda^2=7$	$C_\lambda^2=5$	$C_\lambda^2=4$	$C_\lambda^2=2$	$C_\lambda^2=1$	$C_\lambda^2=0$
Nodo 1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Nodo 2	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00
Nodo 3	1,48	1,10	0,90	0,48	0,26	0,02
Nodo 4	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Tabla 7.6: W_q (Tiempo esperado en la fila de cada nodo) para distintos C_λ^2

A continuación se muestra en las tablas 7.7 y 7.8 los largos de fila en cada nodo si se disminuye el tiempo entre llegadas de camiones con un coeficiente cuadrado de variación $C_\lambda^2 = 2$ y $C_\lambda^2 = 1$. La capacidad y la utilización de los nodos no cambia al modificar C_λ^2 .

Nodo 3	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	5	8	16
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	2	3	5	24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	2	2	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 7.7: Largo de fila con $C_\lambda^2 = 2$

Con el C_λ^2 actual se produce cuello de botella en el nodo 3 donde se genera una fila de 74 camiones. Al disminuir el tiempo entre llegadas de camiones y bajar C_λ^2 a 2, la fila de camiones en el nodo 3 baja a 24 camiones.

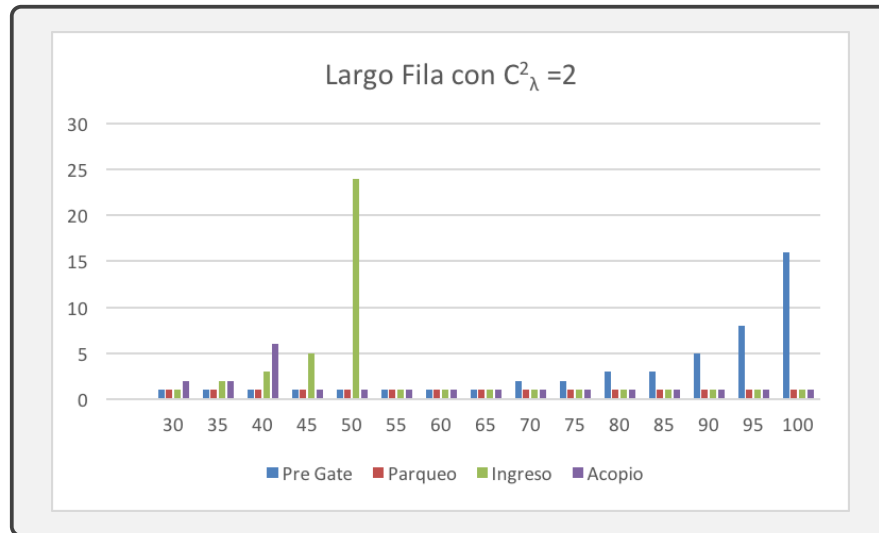


Figura 7.4: Largo de fila con $C_\lambda^2 = 2$

Al bajar el coeficiente cuadrado de variación a $C_\lambda^2 = 1$ disminuye la fila del nodo 3 a 13 camiones, un

45 % menos que con $C_\lambda^2 = 2$ y un 82 % menos que con $C_\lambda^2 = 7$.

Nodo	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	4	9
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	2	3	13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 7.8: Largo de fila con $C_\lambda^2 = 1$

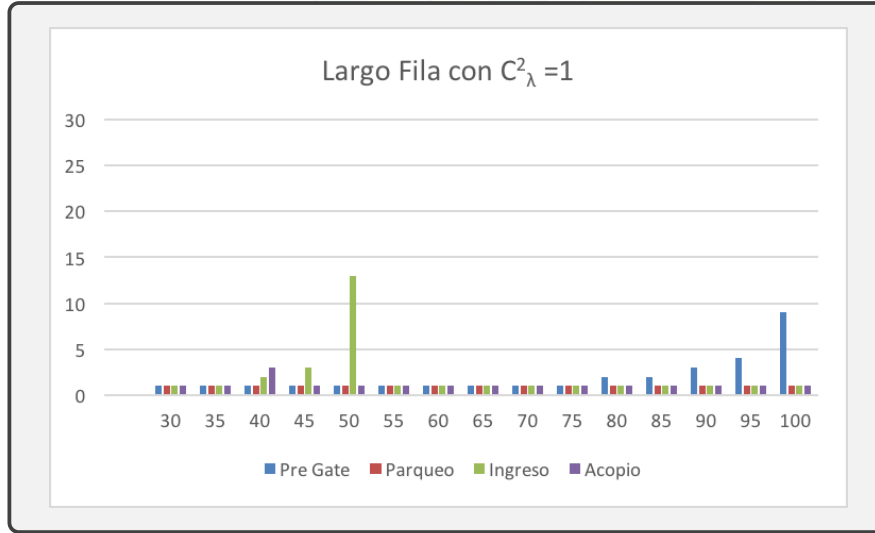


Figura 7.5: Largo de fila con $C_\lambda^2 = 1$

Finalmente se pueden ver las tablas 7.9 y 7.10 donde se muestra el largo de la fila y el tiempo de espera en cada nodo para $\lambda = 55$, $\lambda = 50$ y para $C_\lambda^2 = 7, C_\lambda^2 = 1$.

Con $\lambda = 55$ el sistema está estable con una utilización del 53 % en el nodo 3, ya que se debe utilizar un servidor adicional que en el caso de $\lambda = 50$. En este caso los valores de L_q y W_q no cambian al disminuir $C_\lambda^2 = 7$.

$\lambda = 55$			$C_\lambda^2 = 7$		$C_\lambda^2 = 1$	
Nodo	S_i	ρ	L_q	W_q	L_q	W_q
1	1	52 %	1	0,015	1	0,015
2	1	4 %	1	0,073	1	0,073
3	2	53 %	1	0,018	1	0,018
4	2	65 %	1	0,018	1	0,018

Tabla 7.9: Cuadro Comparativo para $\lambda = 55$

Con $\lambda = 50$ se ve un cambio significativo al disminuir C_λ^2 . Como el sistema está cercano a su máximo de utilización en el nodo 3 se produce una fila de 74 camiones y un tiempo de espera en ese nodo de 1,48 horas, en cambio al disminuir C_λ^2 a 1 el valor del largo de fila disminuye a 13 camiones y el tiempo de espera a 0,26 horas.

$\lambda = 50$			$C_\lambda^2 = 7$		$C_\lambda^2 = 1$	
Nodo	S_i	ρ	L_q	W_q	L_q	W_q
1	1	47 %	1	0,016	1	0,016
2	1	4 %	1	0,08	1	0,08
3	1	97 %	74	1,48	13	0,26
4	2	59 %	1	0,02	1	0,02

Tabla 7.10: Cuadro Comparativo para $\lambda = 50$

7.3. Mejoras Complementarias

El largo de la fila, cuando el sistema opera con una utilización cercana al 100 % en algunos casos es indeseable, ya que con la capacidad casi copada el sistema opera ineficientemente como en el nodo 3 donde se produce un largo de fila de 74 camiones. Se podría aumentar a un nuevo servidor, aumentando la capacidad y disminuyendo la utilización, pero otra alternativa sería controlar la variabilidad en la entrada de camiones, lo cual permitiría disminuir el largo de la fila. Para disminuir el valor de C_λ^2 , el cual está asociado al tiempo entre llegadas de camiones desde el exterior, se podrían utilizar las siguientes alternativas: sistema de citas o crear una política de incentivos.

7.3.1. Sistema de Citas

Se puede disminuir notoriamente el largo de la fila al disminuir la variabilidad en el tiempo entre llegadas de camiones. Esto se puede lograr a través de un sistema de citas de camiones. Un sistema de citas es un sistema de reservas por medio del cual los transportistas podrán programar el ingreso de carga en el terminal en un espacio de tiempo específico. Para esto es necesario:

1. Negociar con los depósitos y sus transportistas nuevas formas de trabajar, donde todos los involucrados se vean beneficiados
2. Crear algoritmo que calcule el tiempo de citación de cada camión, el cual dependerá de las naves que se encuentren en la programación naviera, los depósitos, transportistas y cantidad de camiones a atender.
3. Crear e implementar sistema informático para las citas

Un sistema de citas además de disminuir C_λ^2 permitiría adelantarse y poder programar la cantidad de servidores que se necesitarán de acuerdo a la demanda programada.

En la tabla 7.5 se puede ver cómo cambia el largo de fila en cada nodo al modificar C_λ^2 .

7.3.2. Política de Incentivos

Otra forma de disminuir la variabilidad en el tiempo entre llegadas sería crear una política de incentivos donde se beneficie a los transportistas que lleguen en horarios con menos demanda.



8 | Evaluación Económica

Como se vio en los Capítulos 6 y 7 las alternativas de solución para disminuir las colas de camiones están dadas por la implementación de más servidores tanto en el Nodo Ingreso como el Nodo Acopio. Para ello se procederá a evaluar económicamente el impacto que implica para STI la implementación de cada servidor.

Cabe señalar, que dado la recomendación para STI será que a lo menos sea implementado un servidor adicional en el Nodo Ingreso y otro en el Nodo Acopio, no se realizará una evaluación económica en el mediano plazo, sino más bien, en forma puntual para un día de utilización de un servidor como también el Costo Fijo que debe asumir el Terminal al tomar la decisión de implementación.

Lo señalado anteriormente, con el fin de lograr que el flujo de camiones sea constante y de esta manera evitar la contaminación, la alta congestión en las calles de San Antonio y dentro del Terminal, mejorar la productividad del Terminal y de los transportistas y, por sobre todo para poder enfrentar el crecimiento que se espera en los próximos años y que podría llegar a un 48 % al año 2030. Antes de comenzar el análisis, se debe distinguir cuales serán los tipos de costos que debe soportar cada servidor, para ello se utilizarán las siguientes definiciones:

$CT = CF + CV$, donde:

CT : Costos Totales.

CF : Costos Fijos.

CV : Costos Variables.

Los costos fijos son todos aquellos costos que la empresa debe soportar independiente si utiliza o no el servidor, mientras que los costos variables son todos aquellos costos que la empresa debe soportar sólo al momento de operar con cada servidor.

8.0.1. Nodo Ingreso

Para el caso del Ingreso la empresa debe implementar la instalación de una nueva caseta, que conste con instalaciones y muebles para uno o más operadores, equipos computacionales e impresoras, etc. De

acuerdo a lo anterior la empresa debe invertir en los siguientes elementos:

Detalle	CLP	USD	Vida Útil	Dep. en Pesos	Dep. en USD
Módulo Contenedor de 20'	3.000.000	4.452	3.650	822	1,22
Computador	350.000	520	1.095	320	0,47
Escritorio + Estantes	520.000	772	1.825	285	0,42
Sillas	140.000	208	1.825	77	0,11
Otras Instalaciones					
Licencias software	66.500	99	1.095	61	0,09
Impresora y Útiles escritorio	550.000	816	1.095	502	0,75
Señalética, barreras de seguridad	2.000.000	2.968	1.095	1.826	2,71
Totales	6.626.500	9.835		3.893	5,78

Tabla 8.1: Inversión Nodo 3

Para este Nodo, se pueden distinguir los siguientes costos:

- Costos Fijos:
 - Depreciación a 10 años de un Módulo de Contenedor de 20 pies.
 - Depreciación a 3 años asociada a los equipos computacionales, impresora, licencias de software
 - Depreciación a 5 años asociada a las instalaciones, como escritorio, sillas, entre otros.
- Costos Variables:
 - Sueldo Operador Caseta
 - Gastos generales, como por ejemplo; Luz, agua, electricidad, útiles de oficina.

Para facilitar la determinación de los costos se determinó realizar los cálculos por día/turno. De esta manera, los costos totales diarios, que se calcularán en USD, para la etapa de Ingreso serían los siguientes:

Costos Fijos	Valor Diario (\$)	Valor Diario (USD)
Módulo Contenedor de 20'	493	0,73
Computador	228	0,34
Escritorio	66	0,1
Silla	16	0,02
Otras Instalaciones	198	0,29
Total Costos Fijos	1.001	1,49

Tabla 8.2: Total Costos fijos Nodo 3

Por lo tanto, el Costo Total (CT) para un nuevo servidor en el Nodo Ingreso es de: $CT = USD 5,78 + USD 66,17 = USD 71,95$ diarios.

Costos Variables	Valor Diario (\$)	Valor Diario (USD)
Operador Caseta	41.667	61,86
Gastos Generales	2.900	4,31
Total Costos Variables	44.567	66,17

Tabla 8.3: Total Costos Variables Nodo 3

8.0.2. Nodo Acopio

Para el caso del Nodo Acopio, es decir para el trabajo en el patio de contenedores vacíos, actualmente existen 3 grúas para contenedores vacíos, por lo que no se considerará en la inversión. Como dato costaría app. 540.000 USD.

Para el caso del Acopio la empresa debe incurrir en la utilización de una nueva Grúa Portacontenedores de Vacíos, acá se pueden distinguir los siguientes costos:

- Costos Fijos:
 - Depreciación a 10 años de Grúa Portacontenedores de Vacíos
- Costos Variables:
 - Consumo de combustible
 - Costo de Mantenimiento
 - Costo Operador de la Grúa

De esta manera, los costos totales diarios para la etapa de Acopio serían los siguientes:

Costos Fijos	Valor Diario (\$)	Valor Diario (USD)
Grúa Portacontenedores Vacíos	99.647	147,95
Total Costos Fijos	99.647	147,95

Tabla 8.4: Total Costos fijos Nodo 4

Costos Variables	Valor Diario (\$)	Valor Diario (USD)
Operador Grúa	41.667	61,86
Consumo Combustible	100.000	148,47
Costo Mantenimiento	80.825	120,00
Total Costos Variables	222.491	330,33

Tabla 8.5: Total Costos Variables Nodo 4

De acuerdo a lo anterior el Costo Total para el nuevo servidor en el Acopio serían de: CT = USD147,95 + USD 330,33 = USD 478,28 diarios.

8.1. Implementación Sistema de Citas

Como se pudo apreciar en Capítulo 7 una forma de optimizar y disminuir la utilización de los nuevos servidores en los Nodos de Ingreso y Acopio y controlar el flujo de camiones dentro y fuera del Terminal es mediante la implementación de un Sistema de Citas, el cual implicaría la siguiente inversión.

Item	Cantidad	Tiempo	Unidad	Costo Unitario	Costo Total	Costo Total en USD
Jefe de Proyectos	1	3 meses	UF	150	450	17.582
Programador	2	3 meses	UF	110	660	25.786
Marketing			UF	200	200	7.814
Total				460	1.310	51.182

Tabla 8.6: Costos Sistema de Citas

Dado esta inversión representa un Costo Fijo para STI, el costo diario que representa, considerando una amortización a tres años, es de USD47,39.

8.2. Costos Totales

En resumen y de acuerdo al análisis anterior, el Terminal (STI) debería soportar los siguientes costos:

8.2.1. Costos Fijos

Costos Fijos por día, independiente del flujo de camiones:

Costos Fijos	Valores en USD
Nodo Ingreso	5,78
Nodo Acopio	147,95
Sistema de Citas	47,39
Total	201,12

Tabla 8.7: Total Costos Fijos

8.2.2. Costos Variables

Costos Variables por turno de operación:

Costos Variables	Valores en USD
Nodo Ingreso	66,17
Nodo Acopio	330,33
Total	396,50

Tabla 8.8: Total Costos Variables

Notar que estos costos están por turno, de esta forma los costos variables dependerán de la cantidad de servidores que se necesiten para satisfacer la demanda programada.



9 | Conclusiones

En este trabajo se analizó el comportamiento de las filas de camiones para la recepción de los contenedores vacíos en el Terminal Internacional de San Antonio (STI). Para analizar el comportamiento de las filas de camiones se utilizó teoría de filas y redes de Jackson. Del modelamiento del proceso a través de redes de Jackson se puede concluir que para reducir la fila de camiones en los distintos nodos es necesario incrementar la cantidad de servidores en los nodos ingreso y acopio, y adicionalmente crear un sistema de citas para disminuir la variabilidad en el ingreso de camiones y aumentar la eficiencia en la utilización de los servidores.

Del estudio computacional se pueden observar los siguientes resultados:

1. Se determinó que con una frecuencia acumulada del 88 % de los casos la tasa de ingreso promedio de camiones (λ) es de 55 camiones/hora.
2. El coeficiente cuadrado de variación del tiempo de servicio de cada nodo (C_{si}^2) es cercano a cero, lo cual indica que los procesos se encuentran automatizados.
3. El coeficiente cuadrado de variación del tiempo entre llegadas al nodo ingreso (C_{λ}^2) es 7, lo cual indica que existe una alta variabilidad entre el tiempo de llegada de camiones, debido a que actualmente se da una ventana de tiempo de 2 días por nave para el ingreso de camiones, los cuales llegan en cualquier momento dentro de esa ventana.
4. De acuerdo al teorema de Jackson para que el sistema se encuentre estable y la capacidad promedio sea superior a la demanda promedio (en el caso analizado 55 camiones por hora) se necesita aumentar la cantidad de servidores a 2 en los nodos de ingreso y acopio.
5. En los parámetros de interés obtenidos para la situación planteada, se puede observar que con una tasa promedio de entrada de camiones igual o menor que 55 y dos servidores en los nodos 3 y 4 el sistema se comporta en forma óptima. El largo de cola más alto no supera a 1 camión y el tiempo de espera es alrededor de 1 minuto en los nodos 1,3 y 4.
6. Si se modifica el valor de λ y se analizan distintos valores se puede observar que se deben cambiar la cantidad de servidores para que el sistema permanezca estable. A medida que aumenta λ se deben

aumentar la cantidad de servidores en los distintos nodos donde se alcance el máximo de utilización. En algunos casos esto no es suficiente para disminuir el largo de la fila, por lo que adicionalmente se debe disminuir el valor de C_λ^2 . Un caso que muestra claramente este punto es un escenario con $\lambda = 50$ y $C_\lambda^2 = 7$ donde el sistema tendría que soportar largas filas, hasta mas de 70 camiones, lo que implica una espera de 89 minutos. Si se disminuye C_λ^2 a 1 la fila bajaría a 13 camiones y se logra llegar a $C_\lambda^2 = 0$ la fila disminuye a 1 camión.

7. El coeficiente cuadrado de variación del tiempo entre llegadas (C_λ^2), parámetro exógeno al sistema analizado, se puede reducir implementando un sistema de citas de camiones. Un sistema de citas es un sistema de reservas por medio del cual los transportistas podrán programar el ingreso de carga en el terminal en un espacio de tiempo específico.
8. Para solucionar el problema de las actuales colas de camiones STI debe hacer inversiones en los nodos 3 y 4 con la implementación de a lo menos un servidor en cada nodo. Siendo la inversión total de USD 549 835.
9. La inversión en los nodos 3 y 4 genera costos fijos de USD 71,95 y USD 147,95, respectivamente. Es decir, un costo fijo total por turno de USD 219,9.
10. La inversión en los nodos 3 y 4 genera costos variables de USD 66,17 y USD 330,33, respectivamente. Es decir, un costo variable total por turno de USD 396,5.
11. Para la implementación de un sistema de citas de camiones se requiere una inversión de USD 51 182 y un costo fijo de USD 47,39.
12. Si bien, hoy no existe una cuantificación del costo que implica tener largas colas de camiones, sobretodo dentro del terminal donde se producen las mayores ineficiencias, tanto el costo fijo como el costo variable, por turno, son marginales considerados dentro de los costos actuales de operación del terminal.

Como conclusión final se puede indicar que dado la infraestructura actual para $\lambda = 55$ no se puede solucionar el problema de largas filas de camiones en STI, dentro y fuera del puerto. Es necesario aumentar la cantidad de servidores en los nodos ingreso y acopio y además implementar un sistema de citas de forma de disminuir la variación del tiempo entre llegada de los camiones.

Bibliografía

González Cancelas, María Nicoleta (2007). *Metodología para la determinación de parámetros de diseño de terminales portuarias de contenedores a partir de datos de tráfico marítimo*. PhD thesis. 3.2

Stahlbock, Robert y Voß, Stefan (2008). Operations research at container terminals: A literature update. *OR Spectrum*, 30(1), 1–52. 3.1, 3.3

Undersecretariat of Transport (2013). Plan Nacional de Desarrollo Portuario. *Conectando Chile*, (Segunda Edición), 1–217. 1

Zhang, Xiaojun; Zeng, Qingcheng; y Chen, Wenhao (2013). Optimization Model for Truck Appointment in Container Terminals. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 96(Cictp), 1938–1947. 1, 3.4