

UNIVERSIDAD ADOLFO IBÁÑEZ

TESIS DE MAGÍSTER

“Cross-Docking con Limitación de Recursos dentro de un Centro de Distribución”

Autor:

Cristóbal Alejandro Léniz Messen

Profesores guía:

Wilfredo Yushimito

*TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL CON
MENCIÓN EN OBRAS CIVILES Y AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA - MENCIÓN INGENIERÍA INDUSTRIAL*

Facultad de Ingeniería y Ciencias

2021

UAI

FACULTAD DE
INGENIERÍA Y
CIENCIAS

UNIVERSIDAD ADOLFO IBÁÑEZ

Resumen

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Magíster en Ciencias de la Ingeniería mención Ingeniería Industrial y para el título de Ingeniero Civil Industrial

“Cross-Docking con Limitación de Recursos dentro de un Centro de Distribución” por Cristóbal Alejandro Léniz Messen

Dentro de los estudios que existen para el funcionamiento de un centro de cross-dock (distribución de las puertas, programación de los camiones, etc.), poco se habla de la distribución de los recursos dentro de estos, a pesar de la importancia que implican estos cambios para su funcionamiento. Este trabajo apunta directamente a estudiar el efecto que tiene la distribución de los recursos en los tiempos totales que las mercaderías pasan en un centro de cross-dock y la Utilización de estos recursos en conjunto con el tiempo entre llegadas de camiones al centro, para determinar un punto de funcionamiento que equilibre el Tiempo Total en el centro y la Utilización máxima de los recursos.

Para ello, se planteó un modelo de simulación de un centro de cross-dock genérico, en el que se estableció y probó un caso base “ideal” en el que cada puerta tiene siempre un recurso. Posteriormente, se realizó un diseño de experimentos de tipo factorial con un ajuste por superficie de respuesta para encontrar una ecuación que se ajuste al comportamiento del Tiempo Total y una para la Utilización. En base a estas ecuaciones, se planteó un modelo de optimización multiobjetivo a resolver con una función objetivo de minimización del Tiempo Total junto con una función de maximización de la Utilización. Aplicando el método de las restricciones para resolución de problemas multiobjetivo, se pasó a tomar la función objetivo de Utilización como una restricción, donde esta no pueda ser menor al 50%. Al resolver este problema, se encontró que existen casos particulares para cuando el tiempo entre llegadas de los camiones es una variable controlada o una variable aleatoria, teniendo un efecto importante en determinar el punto óptimo de funcionamiento.

Palabras clave: Crossdocking, Distribución de Recursos, Optimización Multiobjetivo, Logística.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	5
I.1.	Objetivo General.....	7
I.2.	Objetivos específicos	7
II.	ESTADO DEL ARTE	8
II.1.	Análisis Bibliométrico.....	8
II.2.	Artículos Fundamentales	9
II.2.1.	Estados del Arte	9
II.2.2.	Métodos de Resolución Existentes	12
II.3.	Conclusiones	14
III.	METODOLOGÍA.....	15
III.1.	Simulación de Eventos de Cross-dock	15
III.2.	Diseño de Experimento.....	17
III.3.	Diseño de Superficie de Respuesta.....	19
III.4.	Optimización Multi-Objetivo.....	21
III.5.	Metodología Por Seguir.....	23
IV.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	24
IV.1.	Simulación de un Cross-Dock	24
IV.1.1.	Descripción General del Modelo	24
IV.1.2.	Partes del Modelo en ARENA	24
IV.1.3.	Resultados del Modelo Base	28
IV.2.	Diseño de Experimentos.....	29
IV.2.1.	Variables y Niveles Que Considerar	29
IV.2.2.	Detalle del Diseño de Experimentos.....	29
IV.3.	Superficie de Respuesta.....	30
IV.3.1.	Modelos Ajustados para Utilización y Tiempo de Espera	30
IV.4.	Número Óptimo de Recursos usando Optimización Multi-Objetivo.....	33
IV.4.1.	Modelo de Optimización	33
IV.4.2.	Resultados.....	33

IV.4.3. Análisis de Resultados e Implicancias Operativas	34
V. CONCLUSIONES.....	37
Bibliografía.....	39
ANEXO A	42
ANEXO B	43
ANEXO B.1: Análisis de Varianza original para Tiempo Total.	43
ANEXO B.2: Ajuste de modelo final para Tiempo Total.	43
ANEXO B.3: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para Tiempo Total. ...	43
ANEXO C	44
ANEXO C.1: Análisis de Varianza original para Utilización.	44
ANEXO C.2: Ajuste de modelo final para Utilización.	44
ANEXO C.3: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para Utilización.....	44
ANEXO D	45
ANEXO E	46
ANEXO E.1: Gráfico de resultados para escenario de tiempo entre llegadas aleatorio ($A = -1.41421$).....	46
ANEXO E.2: Gráfico de resultados para escenario de tiempo entre llegadas aleatorio ($A = -1$).....	46
ANEXO E.3: Gráfico de resultados para escenario de tiempo entre llegadas aleatorio ($A = 0$).....	47
ANEXO E.4: Gráfico de resultados para escenario de tiempo entre llegadas aleatorio ($A = 1$).....	47
ANEXO E.5: Gráfico de resultados para escenario de tiempo entre llegadas aleatorio ($A = 1.41421$)	48

I. INTRODUCCIÓN

Tanto en la logística de transporte de grandes empresas como, por ejemplo, en el sector de retail, o como de cargas de tipo less-than-truckload (LTL) se ha ido implementando el uso de cross-docking para agilizar entregas y reducir costos de inventario.

El cross-docking corresponde a un tipo de preparación de pedido sin colocación de mercancía en inventario ni operación de recolección, permitiendo transitar materiales con diferentes destinos o consolidar mercancías provenientes de diferentes orígenes que puede variar de acuerdo con las necesidades del producto. Con esto se busca una reducción de costos de inventario, de manejo de producto, laborales, entre otros, así como mejores tiempos de entrega, menor sobre stock y mejora en la experiencia del cliente, por mencionar algunas. Por ejemplo, en la Figura 1 se puede ver la representación de una cadena de suministro antes y después de la implementación de cross-docking. Por lo tanto, el objetivo del cross-docking consiste en reducir el tiempo y costo que implica el transporte de mercadería desde el proveedor (origen) hasta el distribuidor o cliente que requiera dicha mercadería (destino), como se dijo anteriormente.

Sin embargo, una dimensión a considerar y en la cual se enfocará este trabajo, consiste en el análisis del efecto que tenga la cantidad de recursos disponibles en un centro de distribución, en términos de tiempo y utilización, para así encontrar el número óptimo de recursos dentro de un cross-dock. La hipótesis de trabajo es que este efecto se puede analizar modelando el sistema usando un modelo de simulación basado en un modelo de teoría de colas.

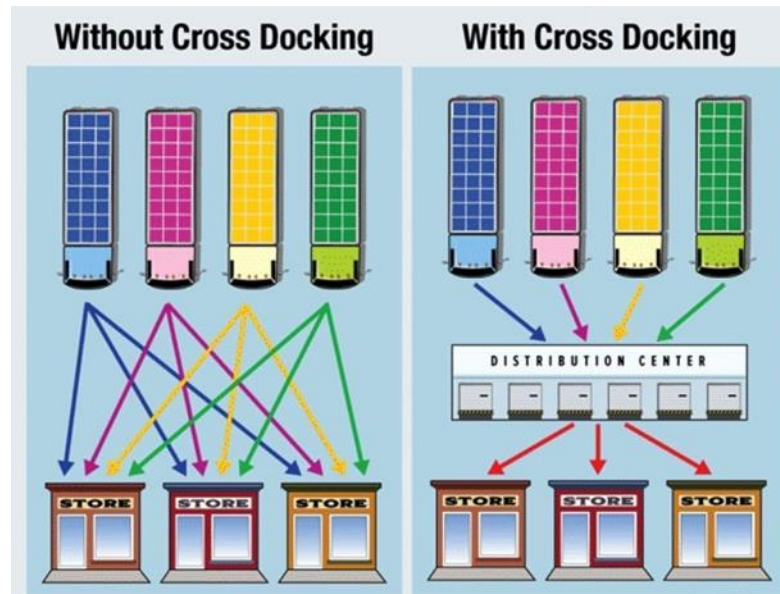


Figura 1: Ejemplo de cadena de suministro de múltiples proveedores y clientes con y sin cross-docking¹.

De esta forma, la oportunidad encontrada a abordar en este trabajo consiste en poder cuantificar, mediante la utilización de recursos en un centro de cross-dock y los tiempos de espera en cola en la entrada y en la salida del centro, cuanto sería un nivel óptimo de disponibilidad de recursos en el centro de cross-dock de manera de maximizar la utilización de dichos recursos como también minimizar los tiempos de espera en el centro de cross-dock, en otras palabras, donde haya un mínimo de recursos “ociosos” manteniendo un tiempo de tránsito por el centro de los productos mínimo. Esta oportunidad se presenta debido a que es un tema virtualmente no tratado en la literatura relacionada a temas de disponibilidad de recursos, habiendo un enfoque más centrado en temas no relacionados directamente con los recursos internos del centro de cross-dock.

¹ <https://clusterlogistic.org/es/todo-lo-que-debes-saber-sobre-cross-docking/>

I.1. Objetivo General

Por esta razón, el objetivo general de este trabajo consiste en *estudiar el efecto que tiene la cantidad de recursos a utilizar en un centro de cross-dock con respecto a su eficiencia (utilización) y al tiempo de estadía de los productos*. Esto apunta a poder establecer un modelo simulado del interior de un centro de cross-dock genérico, para posteriormente establecer el número de recursos que pueda llevar a la mejor eficiencia para su uso en el centro de cross-dock con respecto a la utilización de los recursos y los tiempos de espera y traslado de los productos a través del centro.

I.2. Objetivos específicos

De manera concreta, específicamente esta tesis busca:

- Analizar funcionamiento y forma de trabajo de un centro de cross-dock.
- Generar la configuración del centro de cross-dock en base a su tamaño (muelles de acceso y salida) con una distribución de recursos “ideal”, donde cada muelle tenga recursos disponibles para establecer un punto de referencia en el estudio.
- Analizar el efecto en el funcionamiento de los modelos de cross-dock un cambio en la cantidad de recursos disponibles mediante un modelo de simulación de eventos.
- Analizar los resultados y estudiar el impacto de los recursos en tiempo y utilización de estos mediante un diseño de experimentos con superficie de respuesta.
- Determinar las cantidades óptimas de recursos dentro del centro de cross-dock con respecto a la utilización de los recursos y los tiempos de espera usando un modelo de optimización multiobjetivo.

II. ESTADO DEL ARTE

Este capítulo tiene la siguiente estructura. Primero se hace un análisis bibliométrico en importantes bases de datos y revistas académicas, así como documentos presentados en congresos y bases de datos de tesis y tesis (Scopus y Web of Science) acerca de los estudios de transporte de carga mediante el uso de cross-docking tanto para grandes empresas de retail o distribución, como para distribuciones de tipo less-than-truckload (LTL); una base teórica con las características del cross-docking y; efectos en tiempo y costos del uso de cross-docking. Posteriormente, se clasificaron artículos científicos de acuerdo con la relevancia que tengan con el tema de cross-docking, como por ejemplo que abordan el diseño de centros de cross-dock, como también el diseño de cadenas de suministro y algunos problemas existentes en la actualidad con respecto a costos y tiempo con la implementación de cross-docking.

II.1. Análisis Bibliométrico

En la actualidad se pueden considerar como principales o más grandes bases de datos para realizar análisis de citas *Scopus*, *Web of Science* y *Google Scholar*. No obstante, *Google Scholar* funciona de manera diferente a las otras dos, al mostrar un comportamiento similar a un motor de búsqueda, en donde los resultados que entrega son mucho más amplios, pero sin la rigurosidad de filtrado que se ve en *Scopus* y *Web of Science*, los cuales proporcionan una selección de información más refinada y específica, en especial para temas relacionado con las ciencias y la ingeniería, demostrando cobertura limitada en áreas como ciencias sociales y las humanidades, pero que no tiene un mayor impacto para este trabajo, en contraste, con el mejor filtro de calidad para ciencias e ingeniería de *Scopus* y *Web of Science* (Martin et al., 2018). Por esta razón se consultaron las bases de datos científicas *Scopus* y *Web of Science*.

Dicho esto, la búsqueda realizada se basó en el uso de las siguientes palabras clave combinadas: “*Cross-docking*” y “*Cost and time*”; “*Cross-docking*” y “*Stages*”; “*Less-than-truckload*” y “*Logistics*”; “*Cross-dock*” y “*Logistics*”. Se encontraron 245 artículos. Se pueden ver las estadísticas de resultados para las palabras combinadas en la Tabla 1.

Bases de Datos	Palabras Clave				Total
	"Cross-docking" y "time and cost"	"Cross-docking" y "Stages"	"Less-than-tuckload" y "Logistics"	"Cross-docking" y "Logistics"	
Scopus	2	46	34	74	156
Web of Science	1	9	18	61	89
Total	3	55	52	135	245

Tabla 1: Análisis Bibliométrico de Artículos publicados

Se realizó un análisis de los 245 artículos encontrados, de los cuales, tras una primera clasificación, se excluyeron un total de 144 artículos, que se descompone en 19 artículos que no eran de utilidad al no estar relacionados con el tema a trabajar, 69 artículos que correspondían a resultados duplicados y 56 artículos que no estaban disponibles para su uso. Posterior a esto, con los 101 artículos restantes se realizó una segunda clasificación en base al contenido mismo representado en los puntos respectivos de cada artículo (abstract, objetivos, método, resultados y conclusiones), llevando a la exclusión de otros 80 artículos entre los cuales hay 65 que no resultan útiles y 15 que correspondían a duplicados de otros artículos. Finalmente, se obtuvo un total de 21 artículos a utilizar para la elaboración de este trabajo investigativo, en donde hay 7 artículos que se podrían considerar “fundamentales” para la estructuración y realización de éste. Se debe mencionar que existe un gran volumen de literatura relacionada con el tema de cross-docking, viéndose también una amplia variedad de artículos y documentos académicos relacionados con esta área. Cabe destacar, también, que ninguno de los 21 artículos a utilizar para la realización de este trabajo fue realizado en Chile, siendo varios de ellos aplicados para escenarios ocurridos en China. Sin embargo, a modo de complemento bibliográfico, se investigó en los repositorios de las principales universidades de Chile en el área de la ingeniería industrial como la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC), la Universidad de Chile (UCH), la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) y la Universidad Adolfo Ibáñez (UAI), encontrando disponibilidad de una tesis de pregrado de la UTFSM y una tesis de posgrado de la UCH, las cuales están relacionadas con el tema a tratar de logística de cross-dock, pero aplicándolo en un contexto más cercano como es el chileno.

II.2. Artículos Fundamentales

II.2.1. Estados del Arte

En primer lugar, existen ya trabajos de otros autores donde se realizaron revisiones de literatura y del estado del arte para el cross-docking, como son Van Belle et al. (2012), donde se realiza una revisión al estado del arte de la logística mediante cross-docking, (González-La Rotta

& Becerra-Fernández, 2017). Este trabajo se enfoca en hacer una revisión del estado del arte de los sistemas con cross-dock de los últimos 10 años (con respecto a la fecha de publicación). Asimismo, Kiani Mavi et al. (2020), donde se procede a revisar los conceptos, técnicas y modelos cubiertos por la literatura de cross-docking; y (Ardakani & Fei, 2020), donde se analiza y tabulan distintos artículos relacionados al cross-dock de acuerdo con los temas y áreas de investigación que se abordan en los artículos, como también si estos abordan temas internos o externos a un centro junto con el método de investigación que utilizan.

En el trabajo de Van Belle et al. (2012) se plantea un marco base del estado del arte del cross-docking hasta ese momento, presentando las definiciones y ventajas de este sistema con respecto al sistema de centros de distribución tradicional (menores costos y tiempos de entrega principalmente), como la viabilidad de implementar el sistema de cross-dock de acuerdo a la tasa de demanda del producto y el costo unitario por sub stock, junto con una descripción de las características del cross-docking (física, operacionales y del flujo) así como una revisión de literatura del tema. La principal relevancia de este artículo para este trabajo consiste en que en él se plantea una estructuración y lineamientos básicos para la investigación a realizar en este trabajo, principalmente en el diseño de escenarios a evaluar en simulaciones, como también los parámetros y condiciones de los sistemas de cross-docking, lo anterior planteado en el marco teórico que presenta el artículo en cuestión.

En los trabajos de González-La Rotta & Becerra-Fernández (2017) y de Kiani Mavi et al. (2020) se realiza principalmente una revisión al estado del arte y la literatura relacionada con el cross-docking, respectivamente, en donde se busca generar un marco conceptual de este sistema en los que se plantea una revisión actualizada del estado del arte del cross-docking dentro de un periodo temporal de 10 años entre el 2007 y el 2017 (González-La Rotta & Becerra-Fernández, 2017), como también una revisión a la literatura existente para identificar los mayores conceptos, técnicas y modelos de investigación cubiertos por esta literatura para así informar a investigadores interesados en el área a través de una perspectiva integrada de los huecos investigativos que hay en esta área (Kiani Mavi et al., 2020). Ambos trabajos tienen su relevancia en poder complementar la estructuración básica de este trabajo de investigación, siendo la base para “filtrar” conceptos e información de manera de que la investigación sea adecuada y actualizada para el 2020-2021 y permita obtener resultados más aplicables a ámbitos reales.

El trabajo de (Ardakani & Fei, 2020) se encarga de analizar de manera clara diferentes trabajos relacionados al cross-dock para clasificarlos y tabularlos de acuerdo con el tema y problemática que estos abordan (tiempos de llegada de los camiones, tiempos de procesamiento, etc.), como también si estos abarcan un área interna o externa a un centro de cross-dock. De la misma manera, este trabajo permite también ver claramente los métodos de investigación que se han aplicado a los diferentes temas teniéndolo claramente tabulado y, en menor medida, los medios en los que fueron publicados estos artículos. Este trabajo presenta una relevancia fundamental al poder evaluar aquellos trabajos que se enfocan en el manejo y disponibilidad de recursos en un centro de cross-dock con respecto a su enfoque específico, del cual no se ve un enfoque directo al tema de la disponibilidad de recursos dentro del centro de cross-dock y su efecto de acuerdo con la utilización de los recursos y los tiempos de espera en el centro, tal como se puede ver en la Tabla 2.

N°	Artículo	Problema Tratado	Oportunidad investigativa
1	<i>A bi-objective truck scheduling problem in a cross-docking center with probability of breakdown for trucks.</i>	Planificación de camiones teniendo en cuenta los posibles fallos que puedan tener estos.	No considera directamente recursos disponibles en el centro de distribución, se puede entrar a considerar recursos para mantenimiento o despeje de camiones dañados.
2	<i>Pre-distribution and post-distribution cross-docking operations.</i>	Comparativa que busca demostrar las ventajas y diferencias entre una organización de cross-dock pre-distribución y cross-dock post distribución.	Sin consideración en la cantidad de recursos dentro de un centro, enfoque principal en la estructura de funcionamiento del centro y sus funciones. Utilidad nula por el momento.
3	<i>A robust two-phase heuristic algorithm for the truck scheduling problem in a resource-constrained crossdock.</i>	Algoritmo para determinar la programación de los camiones de llegada y de salida a un centro de cross-dock considerando limitantes en recursos.	Aborda la limitante de recursos para el tema de la programación de los camiones de llegada y salida del centro. Se puede abordar el tema en primera instancia meramente enfocado en los recursos más que la programación de camiones, pudiendo incorporar elementos de esto para un análisis más detallado.
4	<i>A Solution for Cross-Docking Operations Planning, Scheduling and Coordination</i>	Análisis de la coordinación y la planificación en el funcionamiento de un centro de cross-dock bajo determinados supuestos (especificados en el artículo).	Se aborda indirectamente el efecto de la cantidad de recursos disponibles en el centro de distribución. Supuestos se pueden analizar más adelante para entrar a comparar y/o evaluar escenarios diferentes.

5	<i>Scheduling cross-docking operations: Integration of operational uncertainties and resource capacities.</i>	Manejo de llegadas tardías de camiones al centro de distribución por un frente, planificación de los horarios y cargas de trabajo de los empleados en el centro.	Se puede tomar como punto de referencia para el manejo de los recursos disponibles en escenarios a probar.
6	<i>Optimization Models for Locating Cross-docks under Capacity Uncertainty.</i>	Modelos matemáticos para optimizar la ubicación de centros de distribución en una cadena logística.	No se aborda tema relacionado con la disponibilidad de recursos de manera clara, sino que el enfoque es con respecto al espacio físico y ubicación del centro de cross-dock. Se podría encontrar utilidad eventualmente como análisis extra.
7	<i>Pre-distribution vs. post-distribution for cross-docking with transshipments.</i>	Similar a Artículo 2.	Similar a Artículo 2.
8	<i>Multi-criteria robust design of a JIT-based cross-docking distribution center for an auto parts supply chain.</i>	Diseño de un centro de distribución para optimizar el funcionamiento bajo la estrategia "Just-in-Time".	No se aborda directamente el tema de los recursos disponibles para utilizar dentro del centro de cross-dock. Sin embargo, se presenta un diagrama de algoritmo para el funcionamiento del centro que puede ayudar a mejorar modelos propios a probar.

Tabla 2: Análisis de contenido de Artículos relacionados al tema de recursos disponibles en cross-dock

II.2.2. Métodos de Resolución Existentes

El siguiente grupo de artículos se enfoca en métodos de resolución a problemas de cross-docking relacionados al manejo de recursos, como se ejemplifica en la Tabla 2. Por ejemplo, en el trabajo de Shakeri et al. (2012) se plantea un algoritmo para la programación de camiones al tener una limitante de recursos en un centro de cross-dock, en conjunto con determinados supuestos de funcionamiento que permiten establecer los márgenes de la investigación realizada. Por otro lado, el artículo de (Ladier, 2014) se enfoca en analizar los vacíos existentes entre la literatura y las observaciones *in situ* para así plantear, destacando dos líneas de investigación (contabilizar incertidumbres operacionales e incertidumbres de la capacidad de recursos humanos en la plataforma), tres heurísticas que solucionen un problema de programación de camiones de entrada y de salida de un centro de cross-dock con ventanas de tiempo para dichos camiones.

En el trabajo de Shakeri et al. (2012) se plantea un enfoque en plantear un algoritmo de dos fases que permita la programación de los camiones que entran y salen de un centro de cross-dock, teniendo una especial consideración en limitantes que pueda tener este centro con respecto a la disponibilidad de sus recursos. En específico, mediante la suposición de que los recursos no son preventivos, se busca que la primera etapa del algoritmo permita establecer una secuenciación viable de asignación de los camiones a los distintos muelles de carga del centro de cross-dock, para así en la segunda tomar dicha secuenciación y asignar correctamente cada camión al muelle de carga correspondiente que logre establecer los ahorros de tiempo en la programación propuestos, sujeto a un número limitado de recursos de carga y descarga de los camiones. Este artículo tiene una relevancia importante para la investigación a realizar, ya que tiene un enfoque importante a la temática de la limitación de recursos en un centro de cross-dock, principalmente apuntando a la programación de camiones, pudiendo servir de base para un análisis de la limitante de recursos pero enfocado principalmente en el funcionamiento de los recursos y el centro en su totalidad más que en la programación de camiones; también se tiene una utilidad importante en los supuestos que se plantean en el artículo para el funcionamiento del cross-dock, llevando a un modelo de simulación a un comportamiento cercano al funcionamiento de un centro de cross-dock real.

El artículo de (Ladier, 2014) busca analizar los vacíos existentes entre la literatura y las observaciones en terreno, destacando como líneas investigativas la contabilización de las incertidumbres operacionales, como también la capacidad de recursos humanos en la plataforma del centro de cross-dock, para así modelar un problema de programación de camiones con márgenes de tiempo para los camiones de entrada y los de salida mediante programación en enteros y, posteriormente, resuelto mediante tres heurísticas diferentes; las primeras dos heurísticas apuntan a obtener un itinerario de camiones usados como datos en la programación entera (camiones de entrada en la primera heurística y camiones de salida en la segunda), mientras que la tercera heurística considera una búsqueda tabú en la que cada iteración fija el itinerario de los camiones de entrada y los de salida y una programación entera o un flujo de red evalúa el valor de la función objetivo con respecto al nivel de *stock*. La relevancia de este trabajo radica en el manejo que se da de los recursos a utilizar en los modelos que se proponen en dicho artículo, como también en la utilización de los escenarios y modelos planteados como base para escenarios a probar.

El trabajo de Zhengping et al. (2008) se enfoca en plasmar una investigación y trabajo de desarrollo en la solución de problemas de cross-dock con respecto a tres aspectos: planificación optimizada de agrupación de contenedores, agrupamiento, secuenciación y ubicación de contenedores a los muelles; programación en tiempo real que maneja las dinámicas de la llegada de contenedores y las transferencias reales de palés; y coordinación de cross-docking que maneje una asignación/secuenciación de tareas en tiempo real y administración de recursos para lidiar con cambios dinámicos en el centro. El artículo en cuestión resulta relevante para el trabajo investigativo a realizar, ya que se plantean interrogantes y supuestos que amplían las opciones posibles de escenarios a probar en la modelación, como también para ayudar a moldear una representación más realista del modelo.

II.3.Conclusiones

Finalmente, con este trabajo se plantea el análisis a sistemas de cross-dock de manera interna, buscando analizar el comportamiento de los sistemas en temas de utilización de recursos y tiempo en base a la cantidad y distribución de los recursos disponibles en el centro de cross-dock en conjunto con el tiempo entre llegadas de camiones al centro de cross-dock, enfoque que no se ha visto aplicado en la literatura revisada para este trabajo, donde las investigaciones suelen enfocarse en el área de la programación y manejo de temas relacionados con los camiones de entrada y de salida a un centro de cross-dock más que en el funcionamiento mismo del centro y sus procesos.

III. METODOLOGÍA

Este trabajo busca determinar el número óptimo de recursos en un cross-dock para maximizar la utilización de estos y, a la vez, reducir los tiempos de espera. Esto requiere el uso de una serie de metodologías que incluyen, una simulación de eventos discretos para poder modelar el funcionamiento de un cross-dock, así como una forma metodológica de realizar variaciones a la cantidad de recursos para poder analizar el efecto de estos cambios en las métricas elegidas. Para esto último se necesita diseñar un experimento factorial y el uso de una metodología llamada superficie de respuesta para poder ajustar funciones que permitan luego ser utilizadas en modelos de optimización. Finalmente, y dado que hay más de una respuesta que se quiere optimizar, se requiere el uso de optimización de múltiples respuestas. En este capítulo se describe el marco teórico de cada una de estas metodologías y termina con una explicación del proceso a seguir.

III.1. Simulación de Eventos de Cross-dock

Como explican Banks et al. (2014), existen varios tipos de modelos de simulación, dependiendo de si los modelos representan o no a un sistema continuo o a uno discreto. En los sistemas discretos, la variable estado del sistema cambia en un conjunto de momentos discretos de tiempo. Por ejemplo, en un cross-dock una variable estado, tal como podría ser el número de camiones en el cross-dock, cambia solo cuando llega o se va un camión (ver Figura 2). Por el otro lado, en un sistema continuo la variable estado cambia continuamente en el tiempo, como, por ejemplo, podría ser el agua acumulada por lluvia (ver Figura 3). Una simulación de eventos discretos, por tanto, se puede definir como un modelo de un sistema en el que los eventos ocurren en un conjunto discreto de estados o tiempos. Dado que en este tipo de modelos no hay necesariamente un modelo analítico concreto sino más bien uno numérico, estos modelos requieren el uso de un computador para obtener resultados luego de correr el modelo para ciertas condiciones obtenidas a través de recolección de datos. Estos se incorporan en los modelos y definen los parámetros de este. El proceso típico que se sigue cuando se hace un modelo de simulación de eventos discreto lo describe Banks et al. (2014) y consiste en: (1) definir el problema, (2) definir los objetivos del modelo, (3) conceptualizar el modelo y en paralelo recolectar los datos, (4) realizar el modelo y obtener resultados, y (5) validar los resultados. Adicionalmente, se suele hacer modelos de diseño experimental para definir el número de corridas y para análisis posterior.

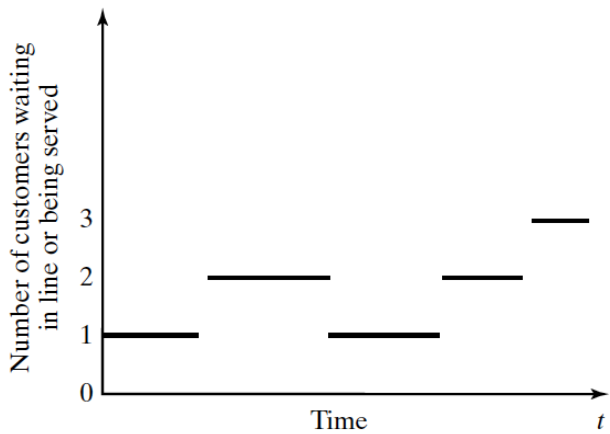


Figura 2: Sistema de variable estado discreta.

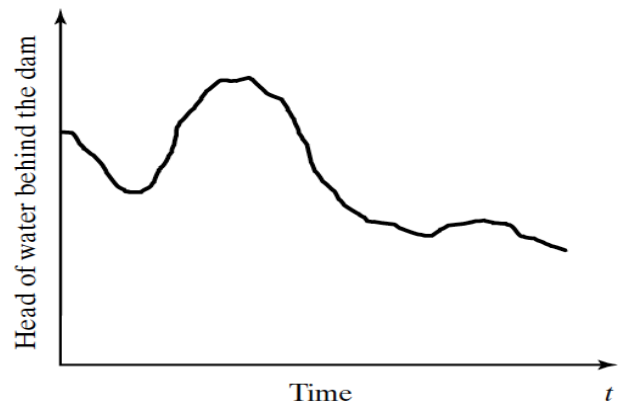


Figura 3: Sistema de variable estado continua.

La simulación de eventos de cross-dock se basa en la simulación de eventos discretos, considerada comúnmente en el diseño y ejecución de operaciones en una cadena logística porque es un método efectivo de representar las interdependencias entre organizaciones, además de que es una de las mejores herramientas para lidiar con la naturaleza dinámica de una cadena de suministro. Por esta razón, permite representar los efectos en eficiencia de factores operacionales, como también tratar con la incertidumbre de una cadena de suministro y dinámica de sistemas complejos (Maglabeh et al. 2005).

Tal como describe Maglabeh et al. (2005), se puede tomar un modelo genérico de un centro de cross-dock para analizar su funcionamiento, donde se considera un set de proveedores que “ingresan” al centro y un set de centros de distribución que “salen” del centro, que se pueden asumir como los “clientes” del centro de cross-dock. Esta configuración genérica permite una gran versatilidad para investigar y buscar solución para diversos problemas al ajustar el modelo de acuerdo con la necesidad correspondiente para cada caso.

Ahora, usando esta misma definición genérica de modelo se puede aislar los diferentes segmentos del funcionamiento del centro de cross-dock para un estudio más detallado. Para el caso específico de esta tesis se puede tomar exclusivamente el funcionamiento interno del centro de cross-dock desde el ingreso de camiones hasta la salida de estos, para ajustar y determinar cambios en los factores internos del funcionamiento (disponibilidad de puertas, disponibilidad de recursos, asignaciones prioritarias, etc.) para encontrar como estos afectan en una manera general al funcionamiento en conjunto del centro, pudiendo establecer aquellas relaciones que mejor impacten de manera relevante la utilización de los recursos y/o el tiempo que se dedica al manejo de las mercaderías en general en el centro de cross-dock.

III.2. Diseño de Experimento

El diseño de experimentos es una técnica estadística, desarrollada en el siglo XIX por William Gosset y posteriormente profundizada y ampliada por, entre otros, Ronald Fischer, en la que se toma una serie de pruebas, las que en conjunto se les denomina el “experimento”, y se les realiza repetidas veces cambiando determinados factores que influyen en el resultado de este experimento.

Estos tienen como base los análisis de hipótesis estadística, principalmente la prueba t de Student, o T-test, desarrollada por el mismo William Gosset junto con su modelo estadístico t de Student (siendo Student el seudónimo que utilizaba para realizar sus publicaciones académicas). Esta distribución fue desarrollada para atacar el problema de estimar la media de una población distribuida normalmente cuando el tamaño muestral es pequeño y su desviación estándar es desconocida. Debido a esto mismo, la prueba t de Student es utilizada con una estimación de la desviación en lugar del valor real.

Para la planificación y diseño del experimento se consideran como principios básicos para su ejecución la replicación de la prueba un número significativo de veces, junto con la aleatorización en la realización de estas. Estos fueron los principios planteados y propuestos por Ronald Fischer en dos de sus libros, (Fisher, 1926) y (Fisher, 1935), para así poder analizar y determinar aquellos factores que tienen mayor relevancia e incidencia en los resultados que entregue el experimento.

Uno de los diseños utilizados en el diseño de experimento es el diseño factorial, desarrollado por Fischer, que consiste en un tipo de experimento diseñado que permite estudiar los efectos que varios factores pueden tener en una respuesta. Este experimento consta de dos o más factores, cada uno de los cuales con distintos valores o “niveles”, cuyas unidades experimentales cubren todas las posibles combinaciones de dichos niveles en todos los factores. Este tipo de experimentos permiten estudiar el efecto de cada factor sobre la variable respuesta, así como el efecto de las interacciones entre factores sobre dicha variable.

Un ejemplo simple de esto, considerando dos factores de dos niveles cada uno, consiste en estudiar los niveles de contaminación emitidos por dos centrales termoeléctricas de tipo A y B al funcionar cada una con combustible de tipo X e Y, llevando a probar cuatro experimentos, representados en la Tabla 3.

	Central A	Central B
Experimento 1	X	X
Experimento 2	X	Y
Experimento 3	Y	X
Experimento 4	Y	Y

Tabla 3: *Ejemplo de Combinaciones Experimentales del Diseño Factorial.*

En este ejemplo, podemos notar como esta combinación de un nivel seleccionado de cada factor está presente una vez. Además, notamos que este ejemplo corresponde a un experimento factorial de 2^2 , llamado así porque considera dos niveles para cada dos factores, produciendo un total de 2^2 (4) puntos factoriales.

III.3. Diseño de Superficie de Respuesta

Tal como se define en el trabajo de Carley et al. (2004), el diseño de Superficie de Respuesta es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas útiles para el desarrollo, mejora y optimización de procesos, cuya mayor aplicación se encuentra en situaciones particulares donde varias variables de entrada influyen potencialmente algunas medidas de desempeño o características de calidad del proceso, a las que se les llama respuesta.

Este se utiliza con la finalidad de establecer una serie de experimentos (diseño), para una adecuada predicción de respuesta, para así aproximar una función compleja y desconocida a la data obtenida de un modelo, llevándola a un polinomial de bajo grado, y así determinar las condiciones óptimas en las variables de entrada del modelo, o variables de control, que llevan a una respuesta óptima dentro de una región de interés. Esto se puede visualizar en la Figura 4, donde se ve una serie de experimentos de diseño factorial, junto a su representación ajustada a un polinomio mediante superficie de respuesta.

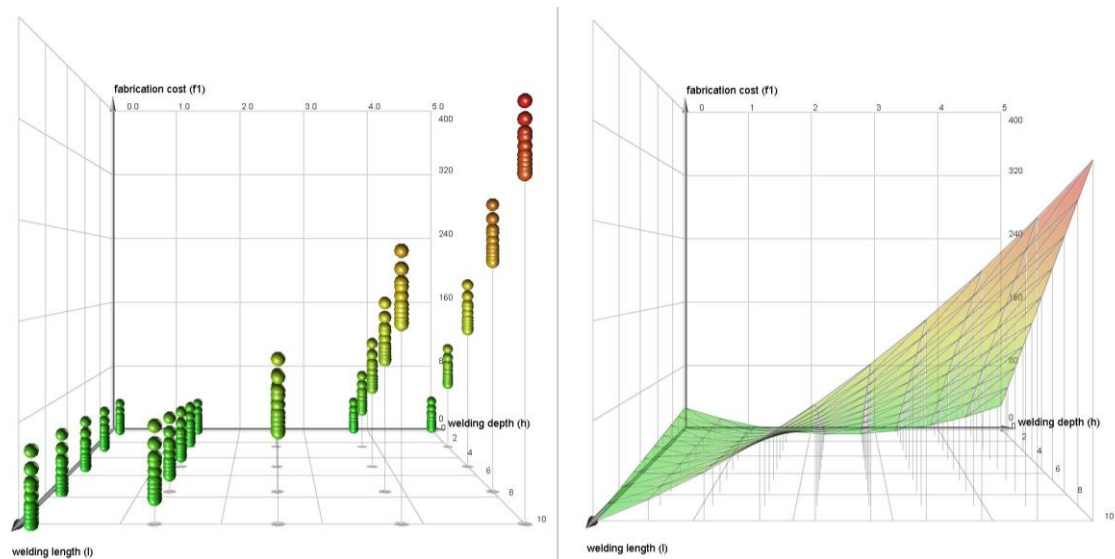


Figura 4: Representación de Superficie de Respuesta Ajustada a un Diseño Factorial.

De esta misma manera, para estimar un modelo polinomial se puede utilizar un diseño factorial de experimentos y así obtener un polinomio de primer grado para determinar que variables explicativas afectan a las variables de respuesta de interés. Al solo quedar variables explicativas se puede pasar a utilizar un diseño de mayor complejidad, como un diseño compuesto central, para estimar un polinomio de segundo grado, que se puede utilizar para optimizar efectivamente las variables de respuesta de interés.

El campo de la metodología de superficie de respuesta consiste en estrategias experimentales para explorar el espacio del proceso o variables independientes, modelamiento estadístico empírico para desarrollar una relación aproximada apropiada entre la producción y las variables del proceso, y métodos de optimización para encontrar los valores de las variables del proceso que producen los valores deseados de respuesta.

La metodología de superficie de respuesta es una rama importante del diseño experimental, siendo una tecnología crítica en el desarrollo de nuevos procesos y optimizando su desempeño. Los objetivos de mejoramiento cualitativo, incluyendo la reducción de variabilidad y mejora de procesos y desempeño de productos, usualmente puede conseguirse directamente utilizando metodología de superficie de respuesta.

III.4. Optimización Multi-Objetivo

La optimización multiobjetivo se diferencia con la optimización de un solo objetivo en que ahora ya no se busca una sola solución óptima, sino que un set de soluciones, en el que se encuentre un rango óptimo para las soluciones, dado que no necesariamente un punto óptimo para una función va a ser el óptimo para todas las funciones que componen el set a optimizar.

A este conjunto de soluciones no dominadas se le llama un conjunto de Pareto, al cual se le puede aplicar la propiedad de optimalidad de Pareto. Esta plantea que para un punto x se le puede considerar un óptimo de Pareto si no existe ningún otro punto z tal que el set de soluciones en z sea mejor que el set de soluciones en x y que en al menos una función del set sea más eficiente la función en z que en x . Este modelo de optimización multiobjetivo se representa mediante la ecuación (1).

$$\min F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \quad (1)$$

Donde $f_i(x)$ con $i = 1, 2, \dots, n$, corresponden a las funciones objetivo individuales del modelo, mientras que $F(x)$ representa el conjunto que agrupa estas funciones objetivo. Por otro lado, si tomamos dos funciones objetivo para el modelo tal que $f_1(x) = a$ y $f_2(x) = b$, podemos representar el conjunto de Pareto, o frontera de Pareto, mediante la Figura 5.

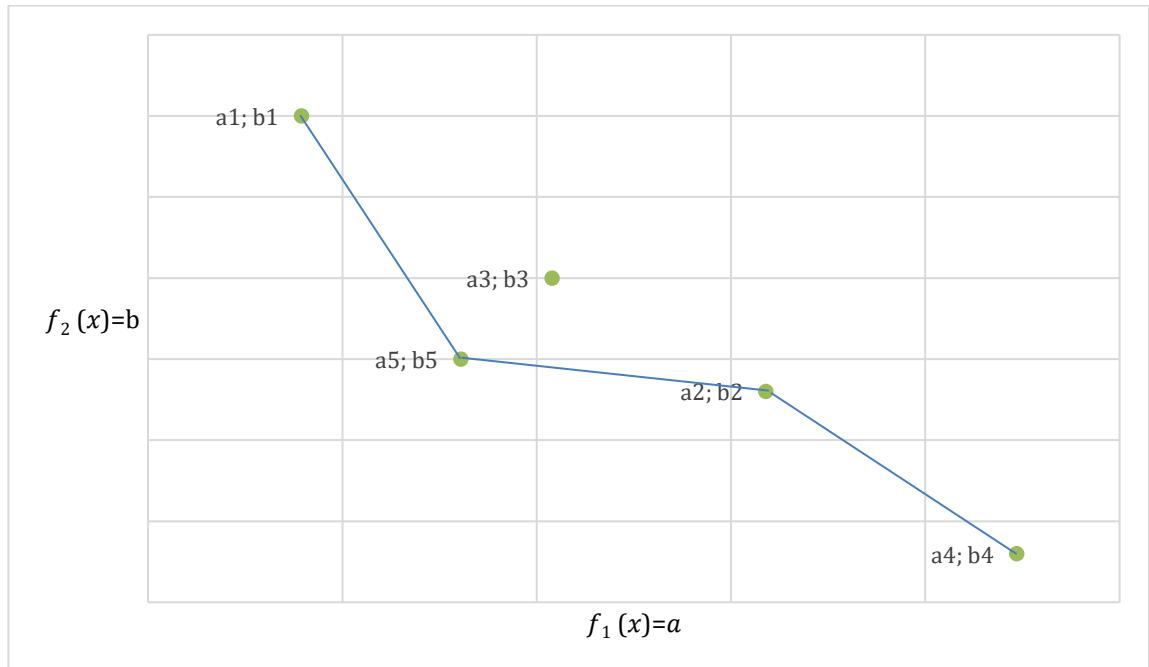


Figura 5: Representación Genérica de una Frontera de Pareto.

Posteriormente, existen dos principales métodos para la resolución de estos problemas. En primer lugar, está el método de los pesos, en el que la idea principal consiste en convertir el problema a un problema de un solo objetivo asignando coeficientes de ponderación a las diferentes funciones objetivo iniciales de manera de optimizar la suma ponderada, pero solo se pueden encontrar todas las soluciones óptimas de Pareto cuando el problema es convexo.

Por el otro lado, se tiene el método de las restricciones, en donde la idea principal es seleccionar una de las funciones objetivo a ser optimizada y convertir las demás en restricciones, estableciendo una cota límite para cada una, pudiendo encontrar el conjunto óptimo de Pareto cuando los sistemas son convexos y cóncavos; sin embargo, el cálculo de la frontera de Pareto con este método requiere de mucho esfuerzo computacional y resulta difícil de formular cuando se tienen muchos objetivos. (Daskin, 2011)

III.5. Metodología a Seguir

Este trabajo busca determinar el número óptimo de recursos en un cross-dock. Para ello los pasos a seguir fueron:

1. Simulación de un sistema de cross-dock. En primer lugar, se plantea el desarrollo de un modelo de simulación de un cross-dock haciendo uso de un software de simulación de eventos discretos Arena (Maglabeh et al., 2005) con el objetivo de evaluar el funcionamiento de una serie de escenarios planteados para estimar la utilización y tiempos de espera en los procesos que componen el trabajo de un cross-dock. Para esto, se parte de un escenario “ideal” de asignación de recursos para comenzar a limitar dichos recursos buscando analizar cómo cambia el comportamiento de estos procesos al limitarse los recursos disponibles, para distintos tamaños de centros de cross-dock, tomando como fuente de referencias el trabajo realizado por Bartholdi et al. (2004).
2. Diseño de un experimento full factorial. Para poder hacer un análisis de la simulación se plantea un experimento full factorial de 3 niveles y 2 variables. De esta forma estas combinaciones definen el total de corridas a hacer con el modelo de simulación.
3. Análisis de superficie de respuesta. Usando la metodología de superficie de respuestas se hace un ajuste a una superficie de respuesta (un modelo no lineal) para la utilización y el tiempo de espera. Estos modelos se validan estadísticamente dejando solo las variables estadísticamente significativas.
4. Optimización con respuestas múltiples. Usando los dos modelos no lineales obtenidos en el paso 3, se resuelve un problema de optimización multiobjetivo. Esto permitió determinar el número de recursos (horquillas con operador) óptimos.

Cada uno de esos pasos incluye un análisis para una conclusión y las implicancias operativas de los resultados en un cross-dock.

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

IV.1. Simulación de un Cross-Dock

IV.1.1. Descripción General del Modelo

En primera instancia, se realizó un modelo de cross-dock para un tipo de centro de distribución: un modelo pequeño con distribución I y 100 muelles, de acuerdo con el trabajo de Bartholdi et al. (2004), ejemplificado en el Anexo A. Este modelo se programó en el software ARENA (Magableh et al., 2005) y tiene como base una asignación de recursos “ideal”, en donde cada puerta de entrada y cada puerta de salida cuenta con un recurso a utilizar (máquina y su operador, por ejemplo) siempre disponible para su uso (disponibilidad del 100%). Este modelo sirve como un punto de partida de análisis con respecto a la utilización de estos recursos, así como también los tiempos en cola de los productos, en caso de haber colas. Este modelo se hizo “a escala”, siendo un proceso de la simulación equivalente a 10 puertas del centro a tamaño real. Posteriormente se modificó la distribución de recursos a fin de poder ver el efecto de un cambio en los parámetros utilización y tiempos en cola, partiendo por establecer un pozo común de recursos para ambos procesos del cross-dock (entrada y salida de mercaderías del centro). Como se verá posteriormente, estos cambios se hacen a través de un diseño de experimento de superficie de respuesta, para así encontrar aquellos parámetros relevantes al modelo a simular, es decir, aquellos que tienen un mayor impacto en los cambios en el Tiempo Total en el sistema y en la Utilización de recursos.

IV.1.2. Partes del Modelo en ARENA

El modelo de ARENA que se utilizó para este trabajo se puede ver en la Figura 6 y se compone de un módulo de ingreso de entidades al sistema, junto con dos clasificaciones (decide) para determinar si se admiten entidades nuevas, por un lado, seguido de una asignación a puertas de descarga. A esto le sigue todo un conjunto de procesos de descarga y asignación de tipo a la carga, para pasar luego a un segundo set de dos clasificaciones para determinar, en primer lugar, si se procesa de inmediato la carga y, posteriormente, la asignación a las puertas de salida del centro de distribución. Finalmente, las entidades del modelo pasan a un conjunto de procesos de carga y consolidación para la salida del centro de distribución. El funcionamiento de las partes del modelo se detalla a continuación.

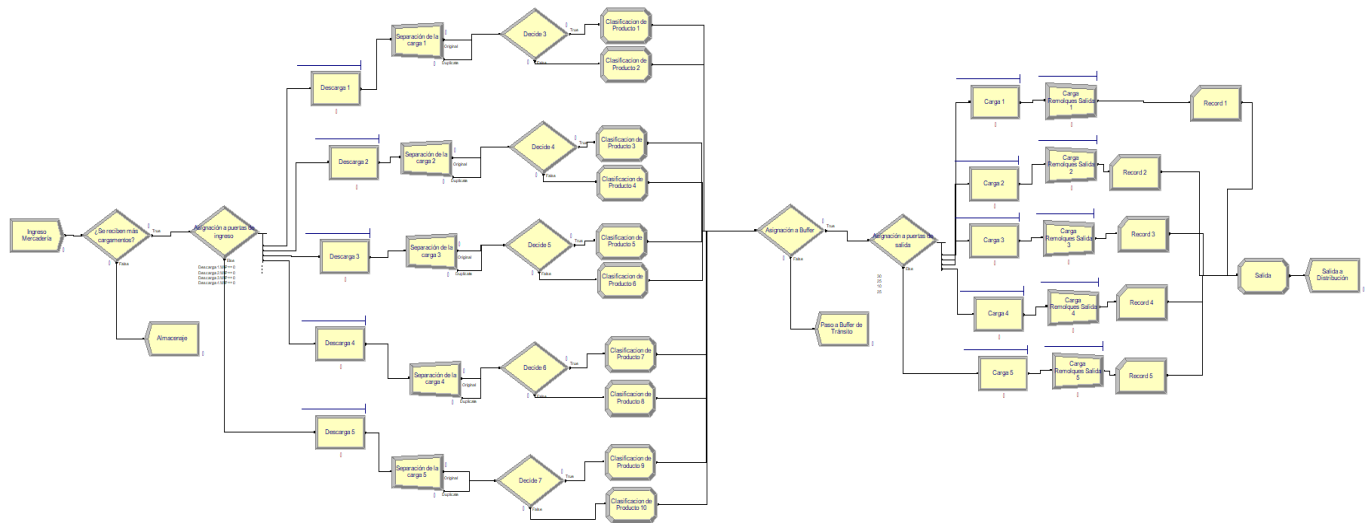


Figura 6: Modelo de centro de distribución tipo en Arena.

IV.1.2.1. Entrada y Asignación

En primer lugar, llegan las entidades al sistema bajo una distribución exponencial con media $\frac{1}{\lambda} = 337.889$ minutos, representando la llegada de camiones al centro de distribución. A medida que van llegando las entidades estas pasan por un “decide” que determina, en base a un parámetro horario, si es que el centro de distribución está aceptando más ingresos de carga, permitiendo el paso de entidades al sistema o enviándolos a un *dispose* para “transferir” la carga a almacenaje. Por último, se llega a un *decide* que asigna los “camiones” a una de las puertas de entrada de acuerdo con su disponibilidad de recibirlo. Esta sección de Entrada y asignación inicial se puede ver en detalle en la Figura 7.

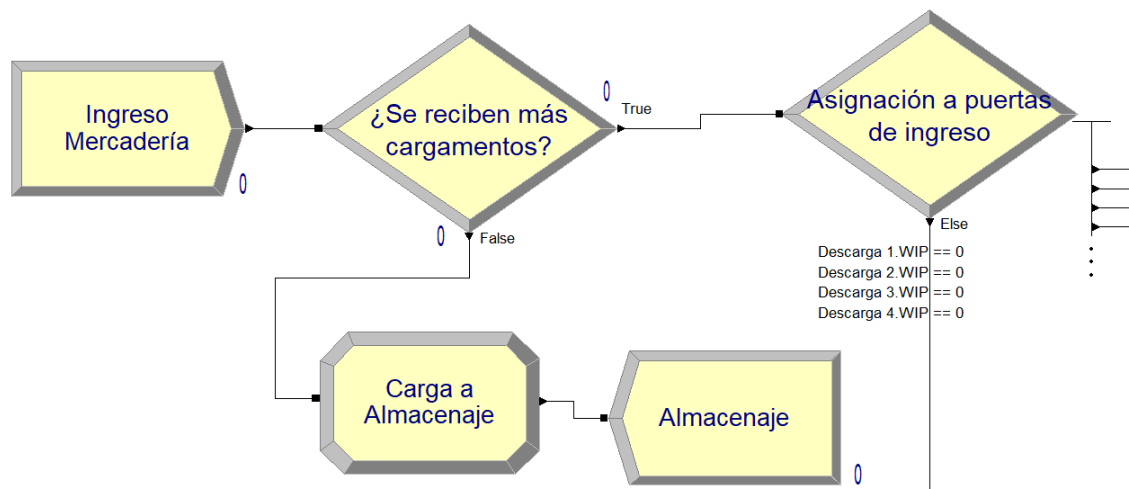


Figura 7: Sección de entrada y asignación inicial de entidades.

IV.1.2.2. Descarga y Clasificación de Carga

En segundo lugar, las entidades pasan a una de las “puertas de descarga”, donde se procesan simulando la descarga de la carga de los camiones, los cuales funcionan mediante un “seize delay reléase”, tomando un recurso de los que se encuentran disponibles y asignados para funcionar con estos procesos y tomando un tiempo con distribución normal con media de 179 y desviación estándar de 129, representando a escala un total de 10 puertas por cada proceso, incluyendo un módulo *separate* que multiplica las entidades para representar los pallets de carga moviéndose dentro del centro de distribución, junto con un conjunto de *assign* para mantener una clasificación clara de la carga y facilitar su seguimiento, determinando de manera aleatoria que clasificación le corresponde a cada par dentro de la puerta de descarga. Esta sección de descarga y clasificación se puede ver en la Figura 8.

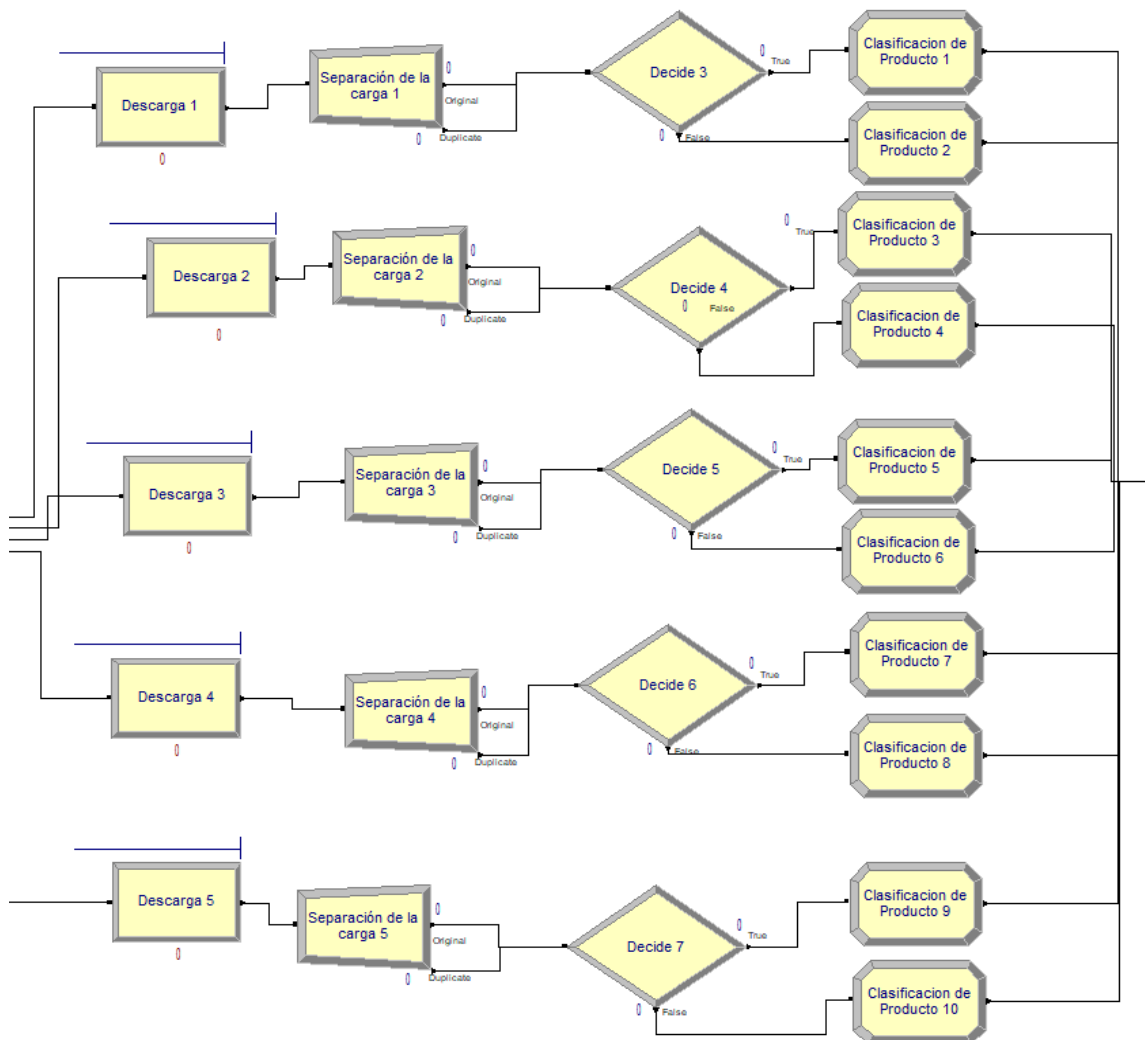


Figura 8: Sección de descarga y clasificación de la carga.

IV.1.2.3. Segunda Sección de Asignación

Posteriormente, las entidades pasan por un segundo conjunto de asignación, partiendo por un bloque *decide* que determina, en base a un criterio horario, si se aceptan entidades para el proceso de carga de los camiones, en donde, en caso de que no se acepten, se derivan a un buffer de tránsito con un *dispose*. En caso de que se acepten entidades para este proceso, estas pasan a un segundo *decide* que las asigna, en base a probabilidades, a alguno de los “muelles” de carga. Esto se puede visualizar en la Figura 9.

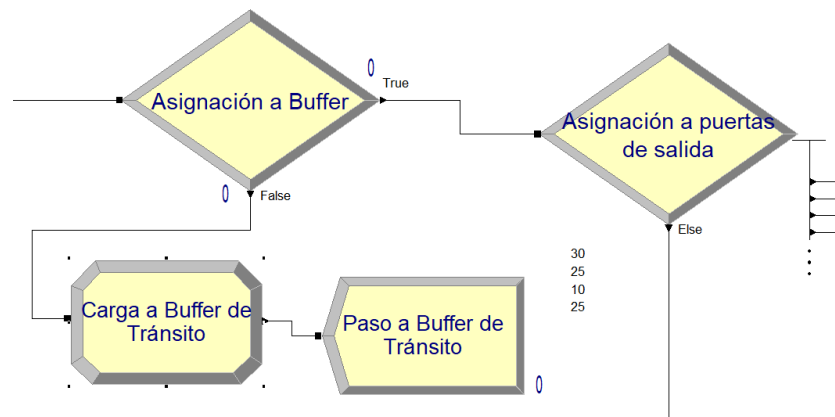


Figura 9: Segunda sección de asignación de entidades.

IV.1.2.4. Carga y Consolidación

Por último, tras ser asignadas, las entidades pasan a la sección de carga y consolidación en los camiones, donde pasan por uno de los “muelles” de carga, en los cuales se tiene primero un proceso de “carga”, que busca representar 10 muelles por cada bloque *process*, en que, de manera similar a los procesos de descarga, corresponden a un proceso del tipo *seize delay release*, donde se toma un recurso del total disponible asignado a dicho proceso, tomando un tiempo distribuido exponencialmente con media de 30, acompañado por un módulo *batch* que permite consolidar un número determinado de entidades antes de poder liberarse y pasar por un bloque *record* en el que se registran los tiempos totales que llevan las entidades en el sistema, antes de dirigirse finalmente al *dispose* que representa la salida final de los camiones cargados del centro de distribución. Esta última sección de la simulación se puede ver en la Figura 10.

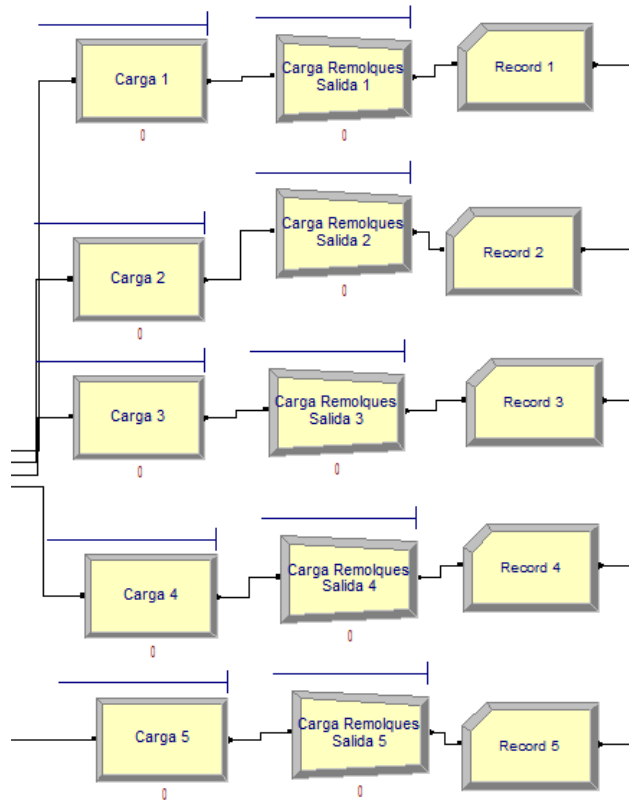


Figura 10: Sección final de carga y consolidación para salida.

IV.1.3. Resultados del Modelo Base

Al realizar la simulación con el modelo base, correspondiente a un caso ideal de la simulación en el que todos los procesos de carga y descarga tienen disponible un recurso en todo momento, se llegó a un resultado de Utilización de los recursos del 26.64% y un Tiempo Total en el sistema de 248.672 minutos, nominalmente. Ahora bien, estos resultados aparentan ser subóptimos, teniendo en cuenta que la Utilización es importantemente baja, y el Tiempo Total resulta nominalmente bajo también, al solo considerar el tiempo transcurrido en cada replicación en ARENA, independiente de la cantidad de entidades que entraron y salieron, habiendo una importante diferencia entre el número de entidades que entra al sistema con respecto a las mismas entidades que salen de este.

IV.2. Diseño de Experimentos

IV.2.1. Variables y Niveles Que Considerar

Después de realizar el caso base, se pasó a realizar un diseño de experimentos para analizar en profundidad los distintos elementos que afectan el Tiempo Total y la Utilización de los recursos disponibles en el centro de distribución. De esto se determinó que las variables más relevantes para el análisis corresponden al tiempo entre llegadas de camiones al centro de distribución y el número de recursos disponibles para utilizar en el centro de distribución. De estas variables, se consideran un total de 5 niveles por variable a considerar, los cuales se ven en la Tabla 4, de acuerdo con la codificación del software Minitab.

Estado	Tasa	Recursos
-1,41421	626,156	1
-1	541,719	4
0	337,869	8
1	134,019	10
1,41421	49,582	15

Tabla 4: Niveles a considerar para variables del modelo.

IV.2.2. Detalle del Diseño de Experimentos

El diseño de experimentos utilizado para este análisis corresponde a un diseño de tipo full factorial para dos factores, entregando una representación cuadrada de la relación entre variables como se ve en la Figura 11. En esta, se puede ver una composición de 2 puntos axiales para cada factor, acompañados de un punto central de análisis como también dos puntos externos a considerar.

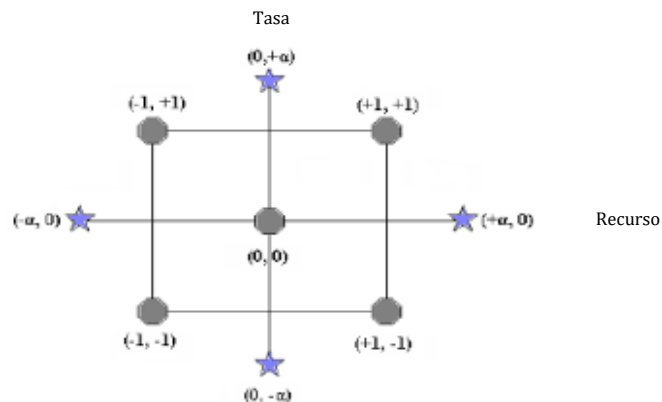


Figura 11: Representación gráfica de los niveles para cada factor ($\alpha = 1,41421$).

El diseño de experimentos utilizado entregó un total de 5 *runs* para tener todas las combinaciones de los niveles de cada factor, representados en la Tabla 5, de manera de cubrir y probar todas las combinaciones posibles de ambos factores al tomar los puntos centrales y axiales del diseño factorial, pero sin considerar por el momento los puntos externos del diseño para cada factor, correspondientes a los niveles -1.41421 y 1.41421.

Run	Blk	A	B
1	1	-	+
2	1	+	-
3	1	0	0
4	1	-	-
5	1	+	+

Tabla 5: Aleatorización de niveles para cada factor.

IV.3. Superficie de Respuesta

IV.3.1. Modelos Ajustados para Utilización y Tiempo de Espera

Posteriormente, al tener estructurado el diseño de experimentos con los respectivos niveles de cada factor, se debió realizar un ajuste mediante superficie de respuesta en el modelo para obtener las ecuaciones que gobiernan los comportamientos de la Utilización y del Tiempo Total. La superficie de respuesta ajustada a los modelos planteados para la Utilización y para el Tiempo Total devolvieron un análisis estadístico, presentado en la Tabla 6 para el Tiempo Total y la Tabla 7 para la Utilización.

Estas tablas se obtienen después de filtrar los términos de cada modelo en base a los valores de p-value obtenidos en los análisis de varianza presentada en los Anexos B.1 y C.1 para Tiempo Total y Utilización, respectivamente, teniendo un ajuste del modelo final con un R^2 de 88.1% para el Tiempo Total y de 88.28% para la Utilización, como se puede ver en los anexos B.2 y C.2.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	4	44168,6	11042,2	14,81	0,001
Linear	1	3834,1	3834,1	5,14	0,053
B	1	3834,1	3834,1	5,14	0,053
Square	2	32275,3	16137,7	21,64	0,001
A*A	1	30622	30622	41,06	0
B*B	1	3986,6	3986,6	5,35	0,05
2-Way Interaction	1	8059,2	8059,2	10,81	0,011
A*B	1	8059,2	8059,2	10,81	0,011
Error	8	5965,7	745,7		
Lack-of-Fit	4	5965,7	1491,4	*	*
Pure Error	4	0	0		
Total	12	50134,3			

Tabla 6: Análisis de varianza para ajuste de modelo de Tiempo Total.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	4	0,94315	0,235788	15,06	0,001
Linear	2	0,75482	0,377411	24,11	0
A	1	0,42157	0,421572	26,93	0,001
B	1	0,33325	0,333251	21,29	0,002
Square	2	0,18833	0,094165	6,02	0,025
A*A	1	0,09964	0,099642	6,37	0,036
B*B	1	0,11319	0,113187	7,23	0,028
Error	8	0,12523	0,015653		
Lack-of-Fit	4	0,12523	0,031307	*	*
Pure Error	4	0	0		
Total	12	1,06838			

Tabla 7: Análisis de varianza para ajuste de modelo de Utilización.

En base a los criterios de p-value se puede categorizar correctamente los factores que tienen importancia en el comportamiento de cada modelo, en conjunto con una representación de la estandarización mediante un gráfico de Pareto para cada modelo a analizar, mostrados en los anexos B.3 para Tiempo Total y C.3 para la Utilización, arrojando la ecuación (2) para el Tiempo Total y la ecuación (3) para la Utilización.

$$TT = 441 - 21.89B - 66.3A^2 - 23.9B^2 - 44.9AB$$

$$R^2 = 0,8810 \quad (2)$$

$$U = 0.2091 + 0.2296A - 0.2041B + 0.1197A^2 + 0.1276B^2$$

$$R^2 = 0,8828 \quad (3)$$

Ahora bien, estos modelos muestran, matemáticamente, un comportamiento decreciente, como se puede ver en la Figura 12, principalmente en la Utilización, en donde se ve que al ir aumentando el número de recursos disponibles, la proporción utilizada de estos es cada vez menor; mientras que, para el caso del Tiempo Total, si bien muestra igualmente un comportamiento decreciente, este es menos pronunciado que en el caso de la Utilización, viéndose un leve aumento en el Tiempo Total al aumentar, en un comienzo, el número de recursos disponibles, para decaer al continuar aumentando la cantidad de estos recursos.

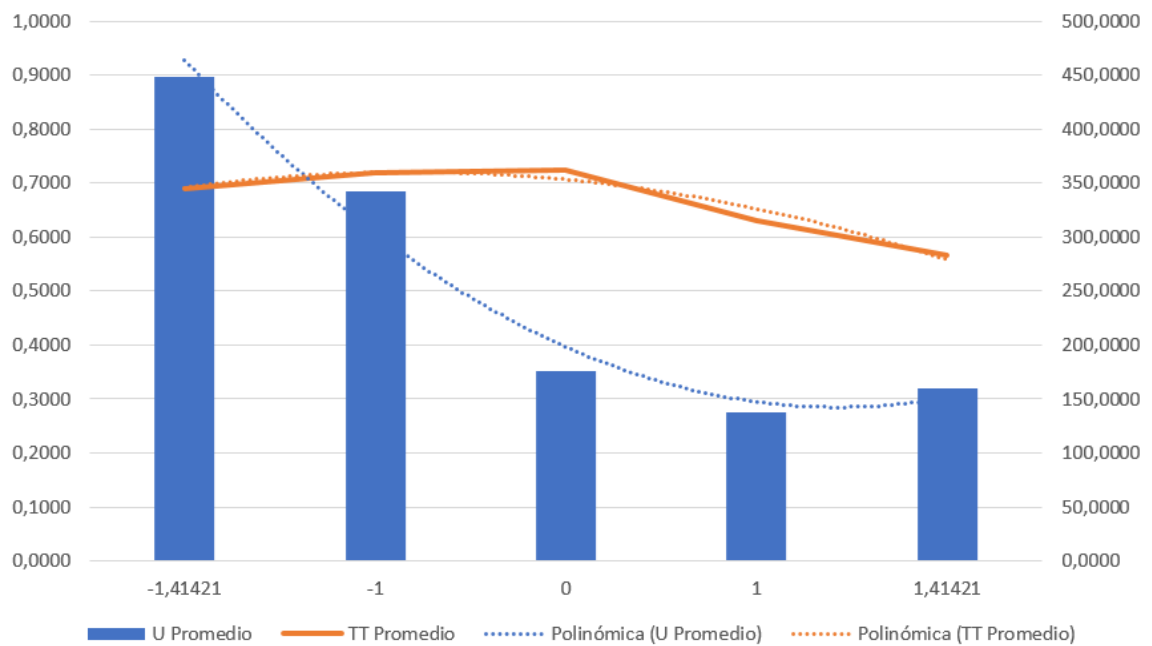


Figura 12: Gráfico Utilización Promedio vs. Tiempo Total Promedio.

IV.4. Número Óptimo de Recursos usando Optimización Multi-Objetivo

IV.4.1. Modelo de Optimización

Para este trabajo, se debió encontrar el punto óptimo de funcionamiento mediante una optimización multiobjetivo, del tipo presentado en la ecuación (1) del capítulo III.4, con $n=2$, es decir, con dos funciones objetivo, en donde se busca minimizar el Tiempo Total de entidades en el sistema, representado por la ecuación (2), y a la vez maximizar la Utilización de los recursos, representado en la ecuación (3). Esto se encuentra sujeto a los límites de los estados que pueden tomar las variables, en este caso tiempo entre llegadas de camiones y número de recursos disponibles, representado por las ecuaciones (4) y (5).

$$-1,41421 \leq A \leq +1,41421 \quad (4)$$

$$-1,41421 \leq B \leq +1,41421 \quad (5)$$

De esta manera, el problema de optimización multi objetivo a resolver queda definido por sus funciones objetivo y sus restricciones de la siguiente manera:

$$\min_{A,B} TT = 441 - 21,89B - 66,3A^2 - 23,9B^2 - 44,9AB$$

$$\max_{A,B} U = 0,2091 + 0,2296A - 0,2041B + 0,1197A^2 + 0,1276B^2$$

$$s. a. \quad -1,41421 \leq A \leq +1,41421$$

$$-1,41421 \leq B \leq +1,41421$$

Ahora bien, para resolver este problema multi objetivo, se aplicó el método de las restricciones, tomando la función objetivo de Utilización y pasándola a una restricción, de manera de minimizar el Tiempo Total y estableciendo un nivel de Utilización establecido, correspondiente al 50% de Utilización, quedando así el modelo de optimización como:

$$\min_{A,B} TT = 441 - 21,89B - 66,3A^2 - 23,9B^2 - 44,9AB$$

$$s. a. \quad -1,41421 \leq A \leq +1,41421$$

$$-1,41421 \leq B \leq +1,41421$$

$$U = 0,2091 + 0,2296A - 0,2041B + 0,1197A^2 + 0,1276B^2 \geq 0,5$$

IV.4.2. Resultados

Al buscar optimizar el modelo presentado, se llegó a tener dos escenarios posibles para los resultados dependiendo de la variabilidad de los términos de la función objetivo, específicamente del tiempo entre llegadas de los camiones.

En primer lugar, tenemos un escenario en el que el tiempo entre llegadas de camiones pueda ser fijado o, en otras palabras, se mantenga como una variable manejable en el modelo, donde el ente encargado del centro de cross-dock y que busca optimizar su funcionamiento determina un valor para el tiempo entre llegadas de camiones, en conjunto con el número de recursos disponibles, para así encontrar un valor óptimo para el modelo. En este escenario se obtuvo que el punto óptimo corresponde al punto $(A; B) = (1,41421; 1,41421)$, obteniendo como resultados para Tiempo Total 139,844 minutos y 73,98% de Utilización, condensado de manera más clara en la Tabla 8.

A	B	Tiempo Total	Utilización
1,41421	1,41421	139,844	73,98%

Tabla 8: Resultados para escenario con tiempo entre llegadas como variable controlada.

Por el otro lado, tenemos un escenario en el que el tiempo entre llegadas de los camiones (variable A) corresponde a una variable aleatoria, es decir, puede tomar cualquier valor dentro del rango presentado en la ecuación (4) del capítulo IV.4.1. Para este caso se planteó un escenario con 5 valores de la variable, presentados en la Tabla 9. Este escenario entregó como resultados promedio, asumiendo igual probabilidad para cada valor de A, una Utilización de 66,57% y un Tiempo Total de 258,513.

A	B	Tiempo Total	Utilización
-1,41421	-1,41421	201,758	66,76%
-1	-1,41421	294,359	64,30%
0	-1,41421	424,157	75,29%
1	1,41421	232,445	52,50%
1,41421	1,41421	139,844	73,98%
	Promedio	258,513	66,57%

Tabla 9: Resultados para escenario con tiempo entre llegadas como variable aleatoria y análisis general.

IV.4.3. Análisis de Resultados e Implicancias Operativas

Tomando los resultados presentados más arriba, se puede establecer un análisis más claro a los resultados obtenidos en este trabajo para cada escenario planteado, donde la variable tiempo entre llegadas puede tomar el comportamiento de una variable controlada, o bien, de una variable aleatoria.

En primer lugar, cuando tenemos al tiempo entre llegadas de los camiones comportándose como una variable controlada, se puede establecer cuál es el camino más eficiente de funcionamiento del centro de cross-dock con respecto a dicha variable y al número de recursos disponibles, habiendo determinado ya, tal como se puede ver en la Tabla 8, que el punto óptimo corresponde al punto (1,41421; 1,41421), donde la Utilización alcanza un valor de 73,98% y las entidades pasan un total de 139,844 minutos en el sistema en promedio. Ahora, esto se puede traducir en, tomando como referencia la Tabla 4, que se deben fijar las variables en tener un tiempo entre llegadas de 49,582 minutos y un total de 15 recursos disponibles para lograr esto.

En segundo lugar, con el tiempo entre llegadas de los camiones presentando un comportamiento de variable aleatoria, para establecer el punto de funcionamiento óptimo de este centro se debe segmentar el análisis para los diferentes escenarios que se pueden presentar con cada uno de los estados que puede presentar el tiempo entre llegada de los camiones.

Por un lado, si tomamos como punto de análisis el Tiempo Total y Utilización promedio del sistema, se obtienen los resultados presentados en la Tabla 9, donde se plantea que, ante la incertidumbre del tiempo entre llegada de camiones e igual probabilidad de que se presente cada uno de los cinco estados de la variable, el número de recursos óptimo no es un punto en específico, sino que más bien es un conjunto optimo, en el que, ante la diferencia entre los escenarios de tener 1 recurso disponible a tener 15 recursos disponibles, se puede llevar a la práctica operativa de un centro de cross-dock a funcionar con 1 recurso de planta y considerar la incorporación de 14 recursos temporales, o bien, plantearse la necesidad de tener de manera constante 1 recurso en el centro de cross-dock y permitir flexibilidad al resto de los recursos de acuerdo a la necesidad que pueda surgir de estos.

Caso 1			
A	B	Tiempo Total	Utilización
-1,41421	-1,41421	201,758	66,76%
-1	-1,41421	294,359	64,30%
0	-1,41421	424,157	75,29%
1	1,41421	232,445	52,50%
1,41421	1,41421	139,844	73,98%
	Promedio	258,513	66,57%
Caso 2			
A	B	Tiempo Total	Utilización
-1,41421	-1,41421	201,758	66,76%
-1	-1,41421	294,359	64,30%
0	-1	438,990	54,08%
1	0	374,700	55,84%
1,41421	1	199,113	69,67%
	Promedio	301,784	62,13%

Tabla 10: Resultados para escenario con tiempo entre llegadas como variable Aleatoria y análisis específico.

Por el otro lado, cuando tomamos un análisis del tipo “caso a caso”, se puede plantear una configuración de recursos que, si bien no es en estricto el punto óptimo absoluto, es un punto viable y considerable al sacrificar un 16,74% de Tiempo Total en el sistema y un 6,67% de la Utilización de los recursos para reducir la diferencia entre los recursos necesarios para cada escenario presentado, permitiendo así una reducción del costo que podría existir al tener un sobre stock de recursos (dicho costo dependería de múltiples factores que escapan al estudio exacto de este trabajo) manteniendo el Tiempo Total de la carga a través del centro de distribución dentro de un rango aceptable (no mayor a 24 horas) para un centro de cross-dock.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha planteado una definición básica de funcionamiento de un centro de cross-dock para llevarlo a un análisis en profundidad con respecto a este mismo funcionamiento al variar diferentes parámetros de este. Tras una revisión a la literatura y el estado del arte relacionado con centros de cross-dock, se llegó a que se ve un vacío de análisis relacionados a los efectos que puede tener una variación en el número de recursos disponibles dentro de un centro de distribución funcionando con un sistema de cross-dock, abriéndose la oportunidad de estudiar el efecto que tiene la cantidad de recursos a utilizar en un centro de cross-dock con respecto a su eficiencia (utilización) y al tiempo de estadía de los productos, para así determinar, tomando como punto de referencia un caso base de funcionamiento “ideal” en donde cada puerta de entrada y de salida del centro de distribución tiene en todo momento un recurso disponible para utilizar, un punto de funcionamiento óptimo en base al número de recursos disponible.

Posteriormente, para determinar esto, se procedió a generar un modelo de simulación en el software ARENA en el que se planteó una distribución genérica de un centro de cross-dock con un total de 100 puertas de entrada/salida, representado a escala con un total de 10 divisiones en el modelo, en el cual se simuló el escenario “ideal” planteado, arrojando un Tiempo Total de las entidades en el sistema de 248,672 minutos y una Utilización de los recursos de 26,64%. Teniendo esto, se pasó a generar un diseño de experimentos factorial que permita, a través de un diseño de superficie de respuesta, obtener las ecuaciones que gobiernan al Tiempo Total y la Utilización, para así pasar a optimizarlas y encontrar un punto de funcionamiento óptimo del centro de distribución simulado.

Luego, al obtener las ecuaciones, se obtuvo un problema de optimización multiobjetivo, en donde se debía optimizar en paralelo el Tiempo Total y la Utilización de recursos, para lo cual se aplicó el método de las restricciones y se trabajó la Utilización como una restricción del problema, planteando un límite mínimo de esta en base a conversaciones con ingenieros del centro de distribución de Walmart. Teniendo ya claros los lineamientos del modelo a optimizar, se utilizó Microsoft Excel para realizar la optimización, en donde se observó la existencia de dos escenarios a optimizar.

Por un lado, se tiene el escenario en el que la variable Tiempo entre Llegadas de camiones se comporta como una variable controlada, en donde el punto óptimo de funcionamiento se encuentra en $(A, B) = (1,41421, 1,41421)$, lo que se traduce en un Tiempo entre llegadas de 49,582 minutos y un total de 15 recursos disponibles, entregando como resultados un Tiempo Total de 139,844 minutos y una Utilización de 73,98%.

Por el otro lado, se tiene el escenario en el que la variable Tiempo entre Llegadas de camiones se comporta como una variable aleatoria, pudiendo tomar los valores $A = \{-1,41421, -1, 0, 1, \}$, donde, al considerar los valores promedio de la Utilización y del Tiempo Total, se pudo obtener un conjunto de punto óptimos, correspondientes a los valores $B = \{-1,41421, -1,41421, -1,41421, 1,41421, 1,41421 \}$, dando un Tiempo Total promedio de 258,513 minutos y una Utilización promedio de 66,57%. Ahora, considerando que la diferencia entre un valor de B de -1,41421 y 1,41421 implica operativamente pasar de tener 1 recurso a tener 15, planteando como escenario óptimo de funcionamiento el tener 1 recurso fijo y 14 variables, o si lo consideramos con trabajadores, tener 1 funcionario de planta y 14 temporales.

En vista de esta disposición de recursos, se pudo plantear un escenario factible, pero subóptimo, en donde se toma como puntos de funcionamiento de manera arbitraria aquellos donde $B = \{-1,41421, -1,41421, -1, 0, 1\}$, entregando como resultado un Tiempo Total promedio de 301,784 minutos y una Utilización promedio de 62,13%. Estos valores se traducen en un aumento del 16,74% en el Tiempo Total y una reducción de 6,67% de Utilización, valores que se pueden tener en consideración al significar una reducción en la brecha de recursos variables.

Finalmente, si bien el alcance de este trabajo se vio limitado por limitantes de software, las posibles líneas investigativas a futuro a partir de este trabajo pueden abarcar lo que corresponda a instancias más grandes de centros de cross-dock, planteando un modelo en el que se simule un centro con más de 100 puertas. Por otro lado, se puede profundizar en el efecto que tendría este estudio en el costo de las políticas laborales que se plantean para el funcionamiento de un centro de cross-dock como el simulado. También se puede buscar investigar los modelos aquí planteados aplicados a alguna empresa o rubro determinado, considerando que esta tesis buscaba mantenerse el plano general del ámbito investigativo.

Bibliografía

- Amini, A., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2016). A bi-objective truck scheduling problem in a cross-docking center with probability of breakdown for trucks. *Computers & Industrial Engineering*, 96, 180-191. doi:10.1016/j.cie.2016.03.023
- Ardakani, A. (., & Fei, J. (2020). A systematic literature review on uncertainties in cross-docking operations. *Modern Supply Chain Research and Applications*, 2(1), 2-22. doi:10.1108/MSRA-04-2019-0011
- Banks, J., Carson, J., Nelson, B., & Nicol, D. (2005). *Discrete-event system simulation - fourth edition*. Pearson.
- Bartholdi, J., & Gue, K. (Mayo de 2004). The Best Shape for a Crossdock. *TRANSPORTATION SCIENCE*, 38(2), 235-244. doi:10.1287/trsc.1030.0077
- Bradley, N. (2007). *The response surface methodology*. Indiana University South Bend. South Bend: Indiana University South Bend. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/40989785/response_surface-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1633131592&Signature=F9rRB3A426Ncpj8Pc~EcZeannEjrrcx bFVfxClhpTWd4rACIvPWXV5oBafKCoepRcmUZGFEBfV-eh1OBx5qX7jSELNsepz6nJQ3QBP-rucMX~fHbq6uApREOxx6~xeM4aoodoDjDafg
- Carley, K., Kamneva, N., & Reminga, J. (2004). *Response surface methodology*. Pittsburgh: Carnegie-Mellon Univ Pittsburgh Pa School of Computer Science. Obtenido de <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA459032.pdf>
- Chen, F., & Song, K. (2009). Minimizing makespan in two-stage hybrid cross docking scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 36(6), 2066-2073. doi:10.1016/j.cor.2008.07.003
- Dai, Z., Aqlan, F., Gao, K., & Zhou, Y. (2019). A two-phase method for multi-echelon location-routing problems in supply chains. *Expert Systems with Applications*, 155, 618-634. doi:10.1016/j.eswa.2018.06.050

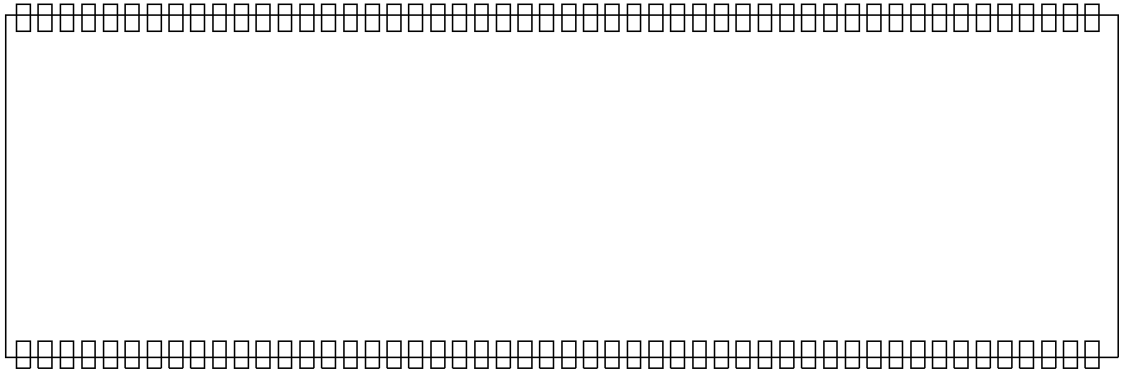
- Daskin, M. (2011). Optimization. En M. Daskin, *Service Science* (págs. 27-109). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/9780470877876
- Esmizadeh, Y., & Mellat Parast, M. (2020). Logistics and supply chain network designs: incorporating competitive priorities and disruption risk management perspectives. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 1-24. doi:10.1080/13675567.2020.1744546
- Fisher, R. A. (1926). The Arrangement of Field Experiments. *Journal of the Ministry of Agriculture* (33), 503-515. doi:10.23637/rothamsted.8v61q
- Fisher, R. A. (1935). *The Design of Experiments*. London: Macmillan Pub Co.
- González-La Rotta, E. C., & Becerra-Fernández, M. (marzo de 2017). Plataformas de intercambio con ruteo de vehículos. Una revisión del estado del arte. *Dyna*, 84(200), 271-280. doi:10.15446/dyna.v84n200.60868
- Kiani Mavi, R., Goh, M., Kiani Mavi, N., Jie, F., Brown, K., Biermann, S. &, & Khanfar, A. (2020). Cross-Docking: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 12(11), 4789. doi:10.3390/su12114789
- Ladier, A.-L. (24 de Noviembre de 2014). Scheduling cross-docking operations: Integration of operational uncertainties and resource capacities. Grenoble, Auvergne-Rhône-Alpes, Francia.
- Lysgaard, J. (1997). Clarke & Wright's savings algorithm. *Department of Management Science and Logistics, The Aarhus School of Business*, 44.
- Magableh, G., Mason, S., & Rossetti, M. (2005). Modeling and analysis of a generic cross-docking facility. *Proceedings of the Winter Simulation Conference.*, 8-pp. doi:10.1145/1162708.1162989
- Marmolejo, J. A., Rodríguez, R., Cruz-Mejia, O., & Saucedo, J. (2016). Design of a distribution network using primal-dual decomposition. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016. doi:10.1155/2016/7851625
- Martín Martín, A., Orduna Malea, E., Thelwall, M., & Delgado López-Cózar, E. (03 de diciembre de 2018). Google Scholar, Web of Science, and Scopus: A systematic comparison of citations in 252 subject categories. *Journal of Informetrics*, 1160-1177. Obtenido de Google Scholar, Web of Science, and Scopus: Which is best

for me?: <https://blogs.lse.ac.uk/impactofsocialsciences/2019/12/03/google-scholar-web-of-science-and-scopus-which-is-best-for-me/>

- Montgomery, D. (2020). *Design and Analysis of Experiments*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Shakeri, M., Low, M. Y., Turner, S. J., & Lee, E. W. (2012). A robust two-phase heuristic algorithm for the truck scheduling problem in a resource-constrained crossdock. *Computers & Operations Research*, 39(11), 2564-2577.
doi:10.1016/j.cor.2012.01.002
- Shi, W., Liu, Z., Shang, J., & Cui, Y. (2013). Multi-criteria robust design of a JIT-based cross-docking distribution center for an auto parts supply chain. *European Journal of Operational Research*, 229(3), 695-706.
doi:10.1016/j.ejor.2013.03.013
- Soanpet, A. (2012). *Optimization Models for Locating Cross-docks under Capacity Uncertainty*. Statler College of Engineering and Mineral Resources, Civil and Environmental Engineering. Morgantown: Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports. doi:10.33915/etd.582
- Tang, S.-L., & Yan, H. (2010). Pre-distribution vs. post-distribution for cross-docking with transshipments. *Omega*, 38(3-4), 192-202.
doi:10.1016/j.omega.2009.09.001
- Van Belle, J., Valckenaers, P., & Cattrysse, D. (2012). Cross-docking: State of the art. *Omega*, 40(6), 827-846. doi:10.1016/j.omega.2012.01.005
- Wan Ahmad Fatthi, W. N., Shuib, A., & Dom, R. M. (2013). Estimating unloading time at cross docking centre by using fuzzy logic. *Research Journal of Business Management*, 7(1), 1-14. doi:10.3923/rjbm.2013.1.14
- Yan, H., & Tang, S.-L. (2009). Pre-distribution and post-distribution cross-docking operations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(6), 843-859. doi:10.1016/j.tre.2009.05.005
- Zhengping, L., Wei, H., Cheng, S., & Chong, C. (Noviembre de 2008). A Solution for Cross-Docking Operations Planning, Scheduling and Coordination. *Journal of Service Science and Management*, 5, 2957-2962.
doi:10.1109/SOLI.2008.4683041

ANEXO A

Diagrama modelo de centro de distribución modelado.



ANEXO B

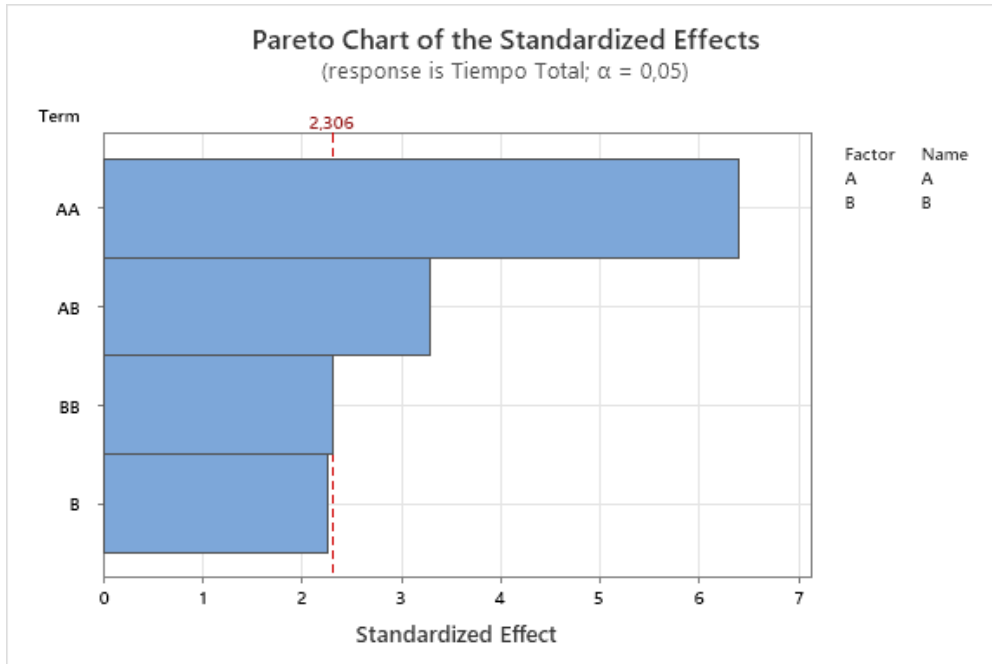
ANEXO B.1: Análisis de Varianza original para Tiempo Total.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	45337,1	9067,4	13,23	0,002
Linear	2	5002,5	2501,3	3,65	0,082
A	1	1168,4	1168,4	1,7	0,233
B	1	3834,1	3834,1	5,59	0,05
Square	2	32275,3	16137,7	23,55	0,001
A*A	1	30622	30622	44,68	0
B*B	1	3986,6	3986,6	5,82	0,047
2-Way Interaction	1	8059,2	8059,2	11,76	0,011
A*B	1	8059,2	8059,2	11,76	0,011
Error	7	4797,2	685,3		
Lack-of-Fit	3	4797,2	1599,1	*	*
Pure Error	4	0	0		
Total	12	50134,3			

ANEXO B.2: Ajuste de modelo final para Tiempo Total.

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
27,3077	88,10%	82,15%	49,81%

ANEXO B.3: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para Tiempo Total.



ANEXO C

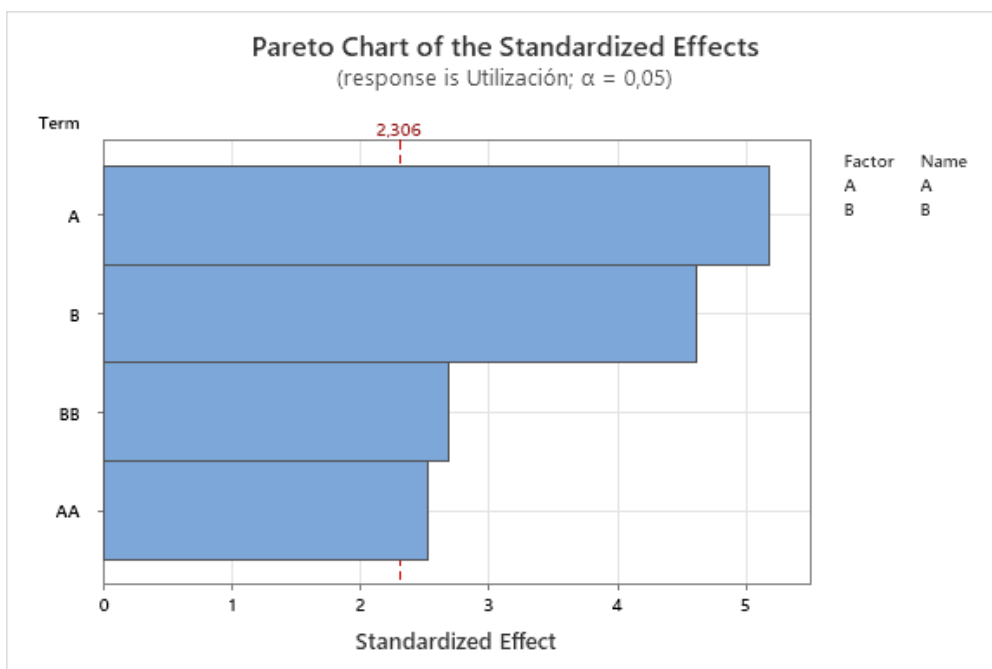
ANEXO C.1: Análisis de Varianza original para Utilización.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	0,9487	0,18974	11,1	0,003
Linear	2	0,75482	0,377411	22,07	0,001
A	1	0,42157	0,421572	24,66	0,002
B	1	0,33325	0,333251	19,49	0,003
Square	2	0,18833	0,094165	5,51	0,037
A*A	1	0,09964	0,099642	5,83	0,046
B*B	1	0,11319	0,113187	6,62	0,037
2-Way Interaction	1	0,00555	0,00555	0,32	0,587
A*B	1	0,00555	0,00555	0,32	0,587
Error	7	0,11968	0,017097		
Lack-of-Fit	3	0,11968	0,039893	*	*
Pure Error	4	0	0		
Total	12	1,06838			

ANEXO C.2: Ajuste de modelo final para Utilización.

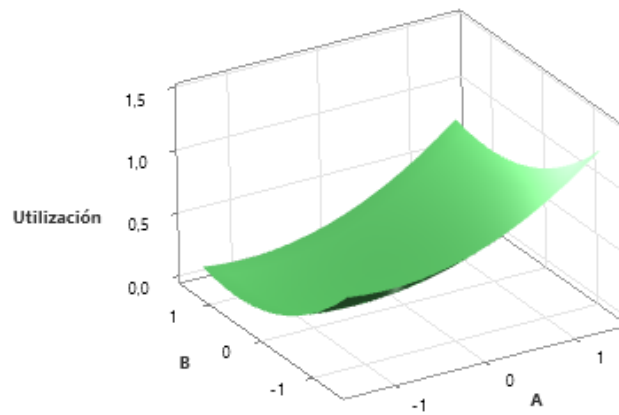
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,125114	88,28%	82,42%	44,50%

ANEXO C.3: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para Utilización.

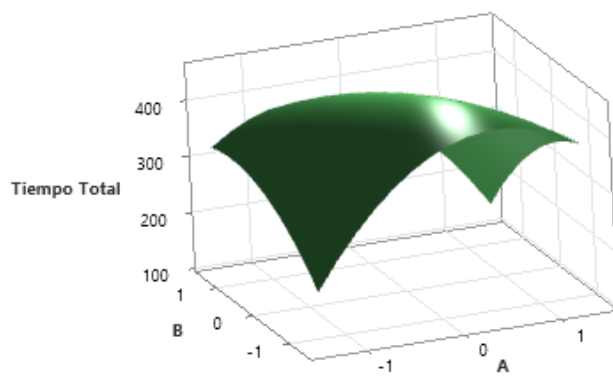


ANEXO D

Surface Plot of Utilización vs B; A

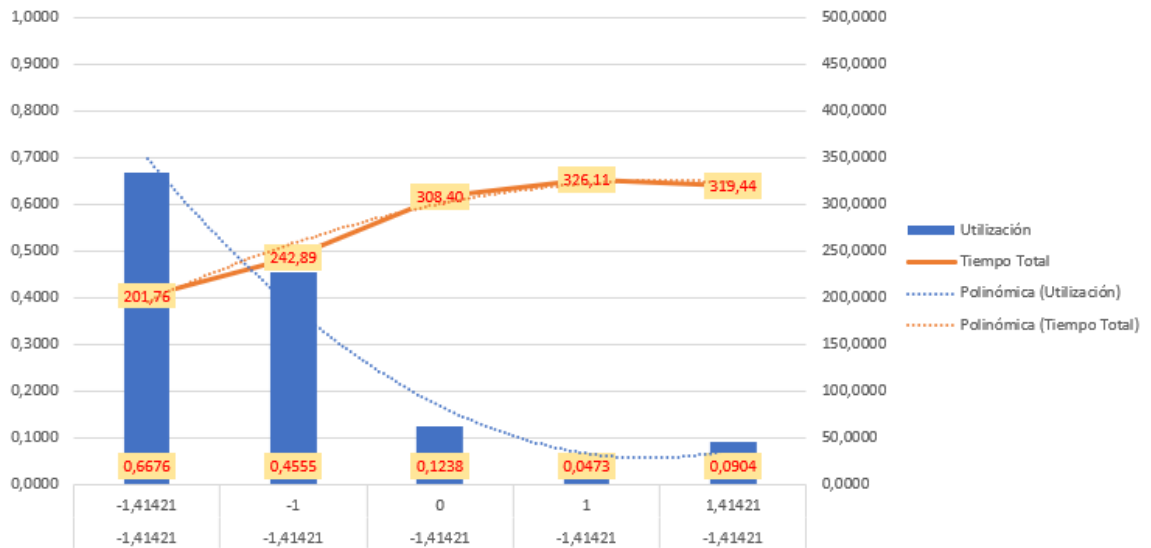


Surface Plot of Tiempo Total vs B; A

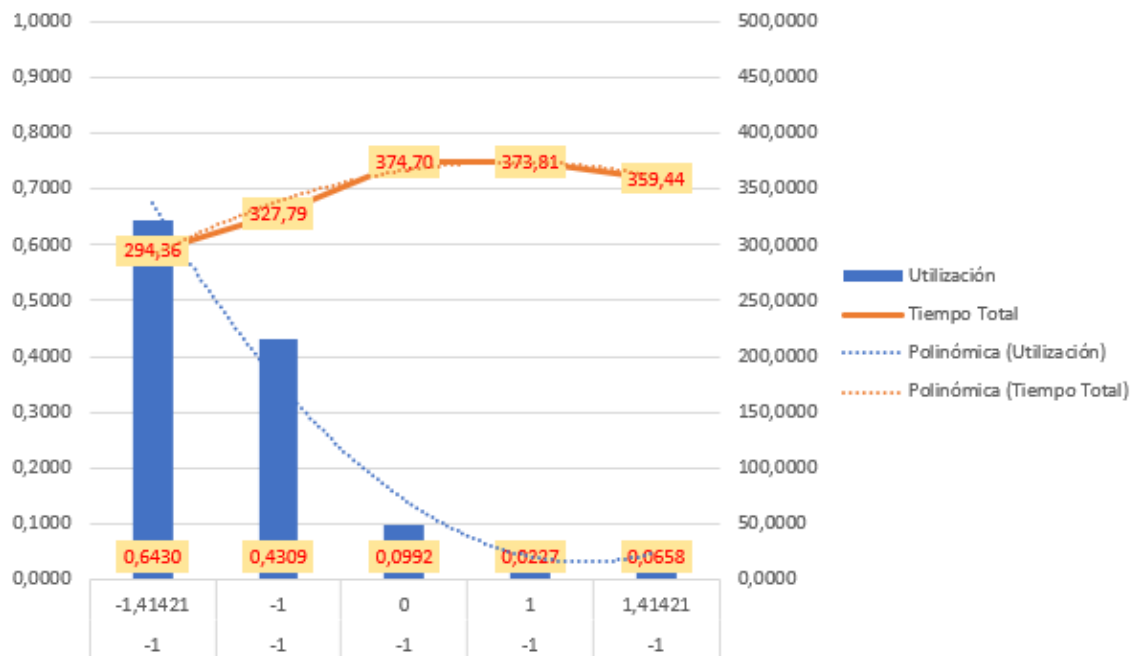


ANEXO E

ANEXO E.1: Gráfico de resultados para escenario de tiempo entre llegadas aleatorio ($A = -1.41421$)



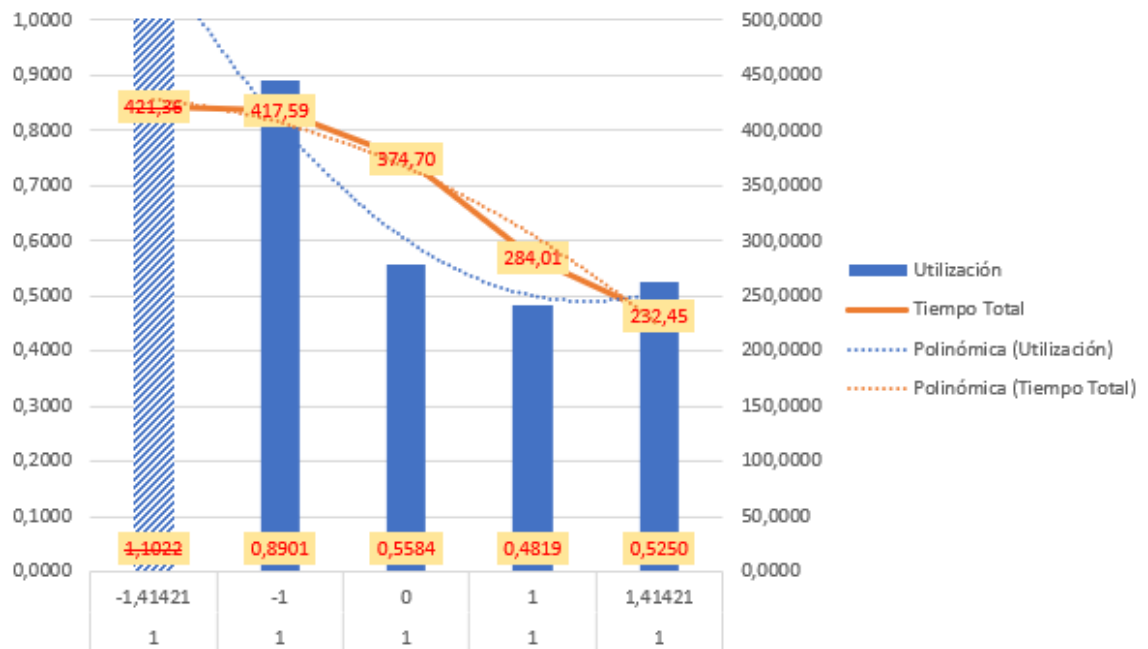
ANEXO E.2: Gráfico de resultados para escenario de tiempo entre llegadas aleatorio ($A = -1$)



ANEXO E.3: Gráfico de resultados para escenario de tiempo entre llegadas aleatorio
($A = 0$)



ANEXO E.4: Gráfico de resultados para escenario de tiempo entre llegadas aleatorio
($A = 1$)



ANEXO E.5: Gráfico de resultados para escenario de tiempo entre llegadas aleatorio
($A = 1.41421$)

