



**Escuela Superior  
de Ingeniería y Tecnología**  
Universidad de La Laguna

## Trabajo de Fin de Grado

---

**Simulación de las operaciones asociadas  
con los centros de Cross-Docking**

*Simulation of the operations associated with Cross-Docking  
centers*

Eduardo Pérez Suárez

---

La Laguna, 11 de julio de 2024

D. **MELIÁN BATISTA, MARÍA BELÉN**, con N.I.F. 44.311.040-E, Catedrática de Universidad adscrita al Departamento de Ingeniería Informática y de Sistemas de la Universidad de La Laguna, como tutora

D. **MORENO VEGA, J. MARCOS**, con N.I.F. 42.841.047-M, Catedrático de Universidad adscrito al Departamento de Ingeniería Informática y de Sistemas de la Universidad de La Laguna, como cotutor

### **C E R T I F I C A ( N )**

Que la presente memoria titulada:

*"Simulación de las operaciones asociadas con los centros de Cross-Docking"*

ha sido realizada bajo su dirección por D. **PÉREZ SUÁREZ, EDUARDO**, con N.I.F. 43.837.660-M.

Y para que así conste, en cumplimiento de la legislación vigente y a los efectos oportunos firman la presente en La Laguna a 11 de julio de 2024

# Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas y entidades que me han apoyado y guiado durante la realización de este trabajo final de carrera.

A mi tutora, por su inestimable supervisión a lo largo de todo el proceso de planificación y desarrollo del trabajo, así como por aportar su vasto conocimiento y proporcionar retroalimentación valiosa que ha enriquecido significativamente este proyecto.

A FlexSim Software Products, Inc., por patrocinarme una licencia gratuita de estudiante que ha sido esencial para llevar a cabo el desarrollo completo del proyecto. Su herramienta ha permitido representar el flujo de datos de manera visual y efectiva.

Al colaborador Josue, por su supervisión y asesoramiento en el uso del software FlexSim. Su perspectiva y conocimientos han sido fundamentales para optimizar el flujo de desarrollo con esta herramienta.

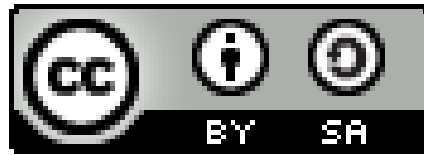
A mi familia, por su apoyo incondicional durante toda mi etapa como estudiante. Su respaldo emocional y económico ha sido crucial para alcanzar este importante logro.

A mi pareja, por ser un apoyo indiscutible durante todo el desarrollo del trabajo. Su compañía y aliento constante han sido una fuente de motivación inagotable.

Y finalmente, a mis amigos, por ayudarme a superar los momentos más difíciles del proceso con su buena actitud. Su apoyo ha sido vital para mantenerme enfocado y positivo.

A todos ustedes, muchas gracias.

# Licencia



© Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-CompartirIgual 4.0 Internacional.

## **Resumen**

*El transporte colaborativo está transformando la gestión del sector, promoviendo el uso compartido de información, redes, instalaciones y vehículos. Aunque inicialmente las empresas eran reacias a compartir datos y espacios, las regulaciones gubernamentales han comenzado a apoyar estas prácticas debido a sus beneficios. Un ejemplo destacado es el cross-docking, una estrategia implementada en centros de distribución y consolidación de mercancías.*

*El cross-docking es un método donde la mercancía se transfiere a un punto intermedio, el cross-dock, donde se clasifica y consolida según los destinos finales, evitando el almacenamiento prolongado. Esto es especialmente útil en lugares como el archipiélago canario, que en 2023 recibió casi 14 millones de turistas, generando una alta demanda de transporte que colapsa carreteras y aumenta la contaminación. Un punto de transbordo intermedio puede optimizar la logística al consolidar mercancía en menos vehículos.*

*Este proyecto aborda el problema de asignación de puertas y planificación de camiones en el cross-dock (Cross-Dock Scheduling Problem - CDSP), buscando minimizar el makespan, que corresponde con el instante de tiempo en el que finaliza el procesamiento del camión que sale del cross-dock en último lugar. El objetivo de este trabajo es identificar e implementar una librería de simulación para modelar soluciones del CDSP y determinar métricas para soluciones robustas, que mantengan su calidad pese a la incertidumbre propia de la operativa real. Los resultados proporcionarán una base para futuras investigaciones, mejorando la eficiencia del transporte en regiones con alta demanda turística y logística.*

**Palabras clave:** Cross-docking, simulación, makespan, FlexSim.

## **Abstract**

*Collaborative transportation, a transformative approach in the sector's management, promotes the sharing of information, networks, facilities, and vehicles. Despite initial hesitations from companies to share data and spaces, the support of government regulations is growing due to the significant benefits of this approach. A prime example is cross-docking, a strategy implemented in distribution and consolidation centers for goods.*

*Cross-docking is a method where goods are transferred to an intermediate point, the cross-dock, where they are sorted and consolidated according to their final destinations, avoiding prolonged storage. This is particularly useful in places like the Canary Islands, which received almost 14 million tourists in 2023, generating high transportation demand that clogs roads and increases pollution. An intermediate transshipment point can optimize logistics by consolidating goods into fewer vehicles.*

*This project addresses the problem of door assignment and truck scheduling in the cross-dock (Cross-Dock Scheduling Problem - CDSP), aiming to minimize the makespan or the time the last truck leaves the cross-dock. This work aims to identify and implement a simulation library to model previous solutions and determine metrics for robust solutions that maintain their quality despite uncertainty in real operations. The results will provide a foundation for future research, improving transportation efficiency in regions with high tourist and logistics demand.*

**Keywords:** Cross-docking, simulation, makespan, FlexSim.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Antecedentes . . . . .	3
1.3. Objetivos . . . . .	4
<b>2. Descripción del modelo de simulación para el CDSP</b>	<b>6</b>
2.1. Marco Conceptual . . . . .	6
2.2. Modelos de Simulación . . . . .	9
2.3. Tecnologías . . . . .	11
2.4. Algoritmo . . . . .	12
2.5. Instancias . . . . .	14
2.6. Solución factible . . . . .	14
<b>3. Traza de un modelo de simulación para una instancia de tamaño <math>8 \times 4</math></b>	<b>16</b>
3.1. Conociendo FlexSim . . . . .	16
3.2. Primera etapa . . . . .	18
3.3. Modelo Final . . . . .	19
3.4. Visualizar los resultados . . . . .	26
<b>4. Resultados de la simulación</b>	<b>29</b>
4.1. Modelo 4x8-2 . . . . .	29
4.2. Resultados de la Simulación . . . . .	33
4.2.1. Utilización de operadores . . . . .	34
4.3. Alteraciones en el Modelo . . . . .	35
<b>5. Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>37</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	37
5.2. Líneas Futuras . . . . .	38
<b>6. Summary and Conclusions</b>	<b>39</b>
6.1. Conclusions . . . . .	39
6.2. Future Lines of Work . . . . .	40
<b>7. Presupuesto</b>	<b>41</b>

# Índice de Figuras

2.1. Tiempo de viaje por unidad entre proveedores y clientes dentro del CDSP . . . . .	7
2.2. Asignación y Planificación para la instancia de ejemplo . . . . .	8
3.1. Primeros pasos en el desarrollo de la simulación. . . . .	17
3.2. Primera Etapa de Desarrollo del Modelo Final . . . . .	18
3.3. Vista General del Modelo Final . . . . .	20
3.4. Elementos del Process Flow de FlexSim . . . . .	22
3.5. Flujo de Proveedores . . . . .	23
3.6. Flujo de transporte de mercancías . . . . .	24
3.7. Flujo de Camiones Clientes . . . . .	25
3.8. Gráficas de Makespan y Velocidad de Operadores . . . . .	26
3.9. Tabla de tiempos de entrada y Salida de Mercancías . . . . .	27
3.10. Utilización de Operadores . . . . .	28
4.1. Traza de la Solución Óptima del modulo 8x4-2 . . . . .	32
4.2. Tiempo de uso de operadores . . . . .	34
4.3. Diagrama de Cajas de Velocidades -Muestra de 1000 . . . . .	36
4.4. Diagrama de Cajas de Cmax - Muestra de 1000 . . . . .	36



# Índice de Tablas

1.1. Cronograma de las actividades a realizar en el proyecto . . . . .	5
2.1. Matriz de flujo de mercancías entre proveedores y clientes . . . . .	7
4.1. Entradas y Salidas de Mercancías . . . . .	33
4.2. Valores de MaxSpeed y Cmax . . . . .	36
7.1. Coste de Personal . . . . .	41
7.2. Coste de Materiales y Herramientas . . . . .	41
7.3. Otros Costes . . . . .	42
7.4. Coste Total del Proyecto . . . . .	42

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

El transporte colaborativo ha surgido como una solución innovadora y necesaria en el contexto actual de creciente demanda logística y restricciones medioambientales. Este modelo colaborativo, donde se comparten recursos y conocimientos entre los diferentes actores del transporte, promete no solo optimizar los procesos de distribución sino también reducir el impacto ambiental.

Un claro ejemplo de estas estrategias es el cross-docking, especialmente en áreas con alta densidad de tráfico y demanda, como el archipiélago canario. El cross-docking permite consolidar mercancías en puntos intermedios, agilizando la distribución y reduciendo el tiempo que los productos permanecen en tránsito. Esto, a su vez, disminuye significativamente la congestión vial y las emisiones contaminantes.

Este trabajo se enfoca en simular y dar soluciones al problema de asignación de puertas y planificación de camiones en un cross-dock (*Cross-Dock Scheduling Problem* - CDSP), con el objetivo de minimizar el *makespan*, es decir, el momento en que el último camión del cliente deja el cross-dock (Rijal et al. (2019), Sayed et al. (2020), Theophilus et al. (2019)). Para ello, utilizaremos una librería de simulación para evaluar las soluciones propuestas para este problema, identificando las mejores formas de medir su eficacia. En un entorno logístico, donde la incertidumbre es una constante, es crucial desarrollar soluciones que mantengan su eficacia ante variaciones inesperadas.

La literatura asociada con las variantes del *Cross-Dock Scheduling Problem* (CDSP) es escasa y muchos trabajos abordan secuencialmente los dos problemas asociados. Los trabajos de Acar et al. (2012), Konur and Golias (2013), Boysen et al. (2013), Liao et al. (2013), y Rahmanzadeh Tootkaleh et al. (2016) abordan el CDSP exclusivamente

para las operaciones entrantes. Consideran que todos los camiones de salida ya están planificados y asignados a puertas de salida. Remitimos al lector al trabajo de Theophilus et al. (2019) para obtener una revisión de los últimos avances sobre la programación de camiones en las terminales de cross-docking.

Zhang et al. (2010) desarrolla un modelo para programar la entrada y salida de camiones y aborda tres funciones objetivo: distancia de viaje, tiempo de espera y hora de salida. El trabajo presenta una formulación lineal entera mixta y un enfoque de restricción-aproximación para determinar la programación de camiones en las instalaciones de cross-dock. Este trabajo considera capacidad ilimitada en las puertas del cross-dock y resuelve instancias pequeñas con hasta cinco puertas y diez camiones. Kuo (2013) estudia el problema integrado de secuenciar todos los camiones entrantes y salientes y asignarlos a puertas de entrada y salida. Funciona en secuencias de camiones entrantes y salientes. Aplica la regla primero secuenciado-primero asignado a la primera puerta disponible. Una vez que se obtienen las secuencias de entrada y salida, un modelo para calcular el makespan asigna todos los camiones entrantes y salientes a sus correspondientes puertas de entrada y salida y luego calcula el makespan. Este trabajo no considera capacidades de puertas, almacenamiento temporal ni horarios de llegada y salida.

Rijal et al. (2019) y Sayed et al. (2020) presentan una generalización de los problemas antes mencionados considerando las dimensiones temporal y espacial, al igual que nuestro trabajo. Hasta donde sabemos, estos son los dos primeros trabajos de investigación que consideran ambas dimensiones simultáneamente al resolver el CDSP. La incorporación de los tiempos de transferencia al problema de programación entre muelles proporciona una mejor integración de la asignación de muelle a muelle y los objetivos de programación de camiones. Rijal et al. (2019) utiliza puertas de modo mixto, en las que se pueden procesar camiones entrantes y salientes. Sayed et al. (2020) utilizan puertas de entrada/salida exclusivas, redistribución y minimiza el espacio de fabricación. Además, consideran que los tiempos de carga y descarga dependen de la carga del camión y de la puerta asignada. En estos dos estudios, el horizonte de planificación se divide en periodos de tiempo en los que se pueden atracar los camiones. Además, no consideran una capacidad máxima de asignación de puertas. Sin embargo, nuestro trabajo considera un horizonte de planificación continuo y una capacidad máxima en las puertas de entrada/salida para la tarea de asignación de puerta de muelle.

Este proyecto no solo pretende ofrecer una herramienta práctica para la simulación y análisis, sino también contribuir a la sostenibilidad y eficiencia del transporte colaborativo en regiones estratégicamente complejas.

## **1.2. Antecedentes**

El estudio del transporte colaborativo ha cobrado relevancia en los últimos años, especialmente en contextos donde la eficiencia logística y la reducción del impacto ambiental son prioritarios (Expósito-Izquierdo et al. (2022)). Diversos estudios han abordado la temática desde diferentes enfoques, proponiendo soluciones innovadoras para optimizar el flujo de mercancías y minimizar la congestión vial. Un caso notable es el empleo del cross-docking, una estrategia de distribución que se ha implementado con éxito en varias regiones del mundo para mejorar la coordinación entre distribuidores y minoristas.

El cross-docking, como se menciona en la introducción, es un método que permite la transferencia eficiente de mercancías desde los puntos de origen hasta los destinos finales sin necesidad de almacenamiento prolongado. Esta técnica ha sido estudiada en profundidad por su capacidad para reducir el tiempo de estancia de las mercancías en los centros de distribución, mejorando así la eficiencia logística y reduciendo el impacto ambiental. En el contexto del archipiélago canario, donde la densidad de tráfico y la demanda logística son especialmente altas, la implementación de estrategias como el cross-docking es crucial para evitar el colapso de las carreteras y disminuir las emisiones contaminantes.

Entre los estudios relevantes, se encuentra el trabajo de investigación llevado a cabo en el puerto de Rotterdam, donde se implementó un sistema de cross-docking para optimizar la distribución de mercancías en el entorno portuario. Este estudio demostró que la correcta asignación de puertas y la programación de camiones son factores críticos para maximizar la eficiencia del sistema. La simulación de diferentes escenarios permitió identificar las mejores prácticas y ajustar las operaciones para minimizar el tiempo de procesamiento de las mercancías Ye et al. (2020); Gelareh et al. (2020); Ladier and Alpan (2014).

Otro ejemplo significativo es el proyecto realizado en el centro logístico de Hamburgo, donde se implementaron algoritmos de optimización para mejorar la secuenciación de camiones y la asignación de puertas en un entorno de cross-docking. Los resultados mostraron una reducción notable en los tiempos de espera y un incremento en la capacidad de manejo

de mercancías, lo que subraya la importancia de utilizar herramientas avanzadas de simulación y optimización en la gestión logística.

Estos antecedentes subrayan la relevancia del problema de asignación de puertas y planificación de camiones en centros de cross-docking (CDSP).

La adopción de librerías de simulación, como se propone en este proyecto de fin de grado, permitirá no solo evaluar las soluciones existentes, sino también identificar métricas robustas que aseguren la eficacia de las operaciones logísticas en entornos complejos y variables. Así, se contribuirá al desarrollo de sistemas logísticos más sostenibles y eficientes, adaptados a las necesidades específicas de regiones con alta densidad de tráfico y demanda, como el archipiélago canario.

### 1.3. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es simular las soluciones obtenidas al resolver el CDSP con métodos exactos y aproximados. La explicación de estos métodos está fuera del alcance del presente trabajo.

Para el cumplimiento de este objetivo se han estimado una serie de pautas a seguir, las cuales son:

- **Estudio del Algoritmo:** Estudiar el problema de optimización considerado (CDSP), sus instancias y soluciones.
- **Investigación de modelos de simulación:** Estudiar los distintos modelos de simulación de la literatura.
- **Implementación de la simulación:** Elegir o crear una herramienta que nos permita implementar nuestro modelo de simulación.
- **Métricas y análisis de resultados:** Obtener datos y resultados que nos aporten conocimiento sobre el modelo.
- **Redacción y presentación final:** Plasmar los resultados del trabajo realizado.

La planificación de dichas tareas queda recogida en el cronograma de la Tabla 1.1, donde se muestran los tiempos estimados para la realización de las mismas. De esta forma, se busca definir y simplificar la línea de desarrollo del proyecto y ajustarnos al objetivo.

Act. / Mes	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.
Estudio del Algoritmo	X	X							
Investigación de Simulación			X	X	X				
Implementación en FlexSim					X	X	X		
Métricas y análisis de resultados							X	X	
Redacción y presentación final								X	X

Tabla 1.1: Cronograma de las actividades a realizar en el proyecto

# Capítulo 2

## Descripción del modelo de simulación para el CDSP

El presente proyecto consiste en generar un modelo para simular las soluciones obtenidas para el CDSP con algoritmos exactos y aproximados. El estudio de estos algoritmos está fuera del alcance del proyecto. Nos centraremos en generar el modelo de simulación y en analizar la robustez de las soluciones proporcionadas por los algoritmos mencionados. Para ello, se usarán simulaciones con agentes reales, lo que nos permite, además, alterar el flujo estático de los datos incluyendo variaciones medidas o aleatorias en los parámetros de las instancias con el fin de obtener conclusiones sobre cómo estas afectan al rendimiento y robustez de las soluciones al problema de cross-docking considerado en este trabajo.

Para todo esto, se ha presentado el uso de la herramienta FlexSim, que nos permitirá representar el flujo de datos de una forma visual a través de los distintos agentes que participan en el modelo FlexSim Software Products (2024).

### 2.1. Marco Conceptual

En un cross-dock, las mercancías se descargan de los camiones entrantes, se consolidan según sus destinos y luego se cargan en los camiones salientes con poco o ningún almacenamiento intermedio. Tal como se indicaba anteriormente, en el artículo de Sayed et al. (2020), que se ha usado como referencia en este proyecto, se aborda el problema integrado de asignación de puertas y planificación de camiones en un centro de *cross-docking* (CDSP). Este problema busca determinar simultáneamente la asignación y la planificación de camiones entrantes a puertas de entrada y camiones salientes a puertas de salida, con el objetivo de minimizar el tiempo total necesario para procesar todos los camiones (*makespan* o

Cmax).

En el estudio se consideran varios factores, como los tiempos de manejo específicos de cada camión, los tiempos de gestión en las puertas y los tiempos que incluyen las etapas de descarga, transferencia y carga de mercancías.

A continuación, se muestra un ejemplo de instancia y solución del problema considerado en este trabajo. Consideremos una instancia pequeña con 8 camiones de entrada/salida y 4 puertas de entrada (*ID*) y puertas de salida (*OD*), *Mod8 × 4 × 15 × 35.txt* (Melián-Batista et al. (2024)), y capacidades de puertas iguales a 22. La tabla 2.1 muestra el número de pallets que viajan desde cada proveedor a cada cliente. La última columna indica el número total de palés que lleva cada proveedor,  $s_k$ , y la última fila indica el número de pallets que recibe cada cliente,  $r_l$ . La figura 2.1 muestra un *cross-dock* con 4 *ID/OD* y los tiempos de viaje considerados por pallet entre cada par de puertas.

Proveedores/Clientes	1	2	3	4	5	6	7	8	$s_k$
1	3	0	3	0	3	0	2	0	11
2	0	0	4	4	0	0	0	3	11
3	0	0	3	0	0	0	2	0	5
4	0	0	0	0	4	0	3	0	7
5	3	2	0	0	0	4	0	0	9
6	0	3	1	0	0	0	4	0	8
7	0	0	0	5	0	0	0	3	8
8	5	2	0	0	0	5	0	4	16
$r_l$	11	7	11	9	7	9	11	10	75

Tabla 2.1: Matriz de flujo de mercancías entre proveedores y clientes

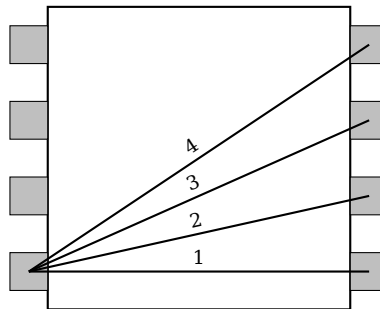


Figura 2.1: Tiempo de viaje por unidad entre proveedores y clientes dentro del CDSP

La figura 2.2 representa la asignación de camiones y la planificación para una solución óptima de la instancia en cuestión, con una duración igual a 40 unidades de tiempo.



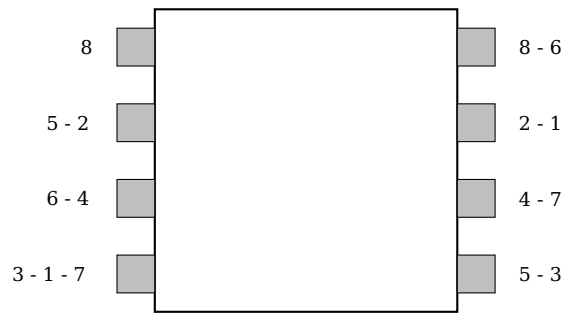


Figura 2.2: Asignación y Planificación para la instancia de ejemplo

Para resolver este problema, el artículo propone dos métodos diferentes. Cada método tiene una formulación matemática y utiliza una combinación de técnicas para encontrar la mejor solución. Estas propuestas ofrecen maneras novedosas para gestionar eficientemente un cross-dock, considerando la complejidad del proceso.

- **Cross-Docking:** Una estrategia logística que facilita el movimiento eficiente de mercancías, donde se descargan los camiones entrantes, se consolida la mercancía descargada según sus destinos y se carga en camiones salientes con poco o ningún almacenamiento intermedio dentro del cross-dock. Esta estrategia logística es usada ampliamente en sectores como el retail, paquetería, electrónica y automotriz para reducir costos logísticos y acelerar el flujo de productos en la cadena de suministro.
- **Problemas de Asignación de Puertas y Planificación de Camiones (CDAP y TSPs):** Los problemas de Asignación de Puertas de Cross-Docking se centran en asignar camiones a puertas específicas dentro de un centro de distribución. Por otro lado, los Problemas de Planificación de Camiones se enfocan en secuenciar los camiones en dichas puertas para minimizar la duración total del programa o reducir la tardanza de los camiones salientes. Estos problemas son NP-duros, por lo que son complejos y difíciles de resolver en la práctica debido a su naturaleza intrincada y a las múltiples variables involucradas.
- **Problemas de Planificación de Cross-Docking con Tiempos de Manejo (CDSP):** El trabajo de Sayed et al. (2020), usado como referencia en este trabajo, presenta una variante del CDSP, en la que se consideran explícitamente los tiempos de manejo para transferir mercancías de camiones entrantes a salientes y los tiempos de carga y descarga dependen de la carga del camión y de la puerta asignada, así como del nivel de habilidad de los trabajadores asignados a cada

puerta.

- **Minimización del Makespan:** El objetivo de las formulaciones matemáticas y algoritmos aproximados usados para generar soluciones de alta calidad para el CDSP es minimizar el *makespan*, que es el tiempo total requerido para procesar todos los camiones en un terminal de cross-docking. Minimizar el *makespan* es fundamental para mejorar la eficiencia y reducir los tiempos de espera, lo que a su vez puede llevar a una mayor satisfacción del cliente y ahorros en costos. En investigación operativa, a este concepto también se le denomina  $C_{max}$  y se refiere al tiempo de finalización máximo en un conjunto de operaciones, en este caso, el conjunto de tiempos que tarda el centro de cross-docking en terminar todas las operaciones de gestión (instante de tiempo en el que sale del cross-dock el último camión).

## 2.2. Modelos de Simulación

- **Modelo Basado en Agentes (ABM):** En un ABM, cada entidad del sistema (como camiones, muelles de carga, operadores) es modelada como un *agente* independiente con su propio conjunto de reglas y comportamientos.

Una de las principales fortalezas de este enfoque es su capacidad para manejar interacciones complejas. Es ideal para modelar sistemas donde las interacciones entre agentes son dinámicas y complicadas. Además, permite la diferenciación entre agentes, asignando a cada uno atributos y comportamientos únicos. Esto es especialmente útil en escenarios donde la heterogeneidad es un factor clave. Los agentes también pueden adaptar sus comportamientos en respuesta a cambios en el entorno, lo que añade un nivel de adaptabilidad significativo al modelo.

Sin embargo, este enfoque también tiene sus limitaciones. Puede ser bastante exigente en términos de recursos computacionales, especialmente cuando se trabaja con un gran número de agentes. Además, el proceso de modelado puede ser complejo, ya que requiere una comprensión detallada de los comportamientos individuales y las reglas de interacción entre los agentes. Esto puede hacer que el desarrollo del modelo sea un desafío considerable.

- **Modelo Basado en Eventos Discretos (DES):** El DES simula la

operación de un sistema como una secuencia de eventos discretos en el tiempo. Cada evento ocurre en un momento específico y marca un cambio en el estado del sistema (por ejemplo, la llegada de un camión, la finalización de la carga/descarga).

Una de las principales fortalezas de este enfoque es su eficacia en términos de tiempo y recursos computacionales. Por lo general, es más eficiente en cuanto al tiempo de cómputo y el uso de recursos. Además, ofrece una gran claridad en el flujo de procesos, siendo muy útil para representar procesos secuenciales y operaciones que dependen del tiempo. Esto facilita el análisis de cuellos de botella, tiempos de espera y la utilización de recursos, permitiendo identificar y abordar problemas de manera más sencilla.

Sin embargo, este enfoque tiene ciertas limitaciones. No captura con tanto detalle las complejas interacciones entre agentes individuales, lo que puede ser una desventaja en sistemas donde estas interacciones son cruciales. Además, tiene menos flexibilidad para modelar cambios en el comportamiento de los agentes debido a sus interacciones. Esto significa que los cambios de comportamiento no se reflejan de manera tan intrínseca como en otros enfoques, como el modelado basado en agentes (ABM).

Dependiendo del enfoque de la simulación, si este fuera analizar la eficiencia operativa, los tiempos de procesamiento, la utilización de recursos y los cuellos de botella en un entorno de cross docking, el Modelo Basado en Eventos Discretos podría ser más adecuado. Ofrece una forma clara y eficiente de modelar las operaciones secuenciales y los procesos basados en el tiempo que son típicos en los entornos de cross docking.

Por otro lado, si tenemos más interés en entender cómo las decisiones y comportamientos individuales de diferentes entidades (como conductores, operadores de carga, etc.) afectan el sistema en general, o si las interacciones entre estos son clave para nuestro estudio, entonces el Modelo Basado en Agentes sería más apropiado. Permite capturar la complejidad y la heterogeneidad de las interacciones a un nivel más detallado.

Sintetizando, se prioriza la eficiencia operativa y los flujos de proceso, seguiremos el modelo DES. Si las interacciones individuales y la adaptabilidad de los agentes son prioritarias, optamos por ABM, en nuestro caso seguiremos un modelo basado en Agentes.

## 2.3. Tecnologías

En este apartado hablaremos de la tecnología elegida y utilizada para recrear la simulación del proyecto y otras opciones disponibles.

Entre todas las opciones nos hemos decantado por la utilización de FlexSim, paquete de software de licencia utilizado por ingenieros para simulaciones.

### **FlexSim**

FlexSim es una herramienta de simulación poderosa con una curva de aprendizaje moderada que permite a los usuarios resolver problemas de negocio con precisión mediante la creación de modelos detallados y visualmente atractivos utilizando operadores, colas y fuentes de mercancías. Altamente versátil, permite conexiones entre elementos de forma manual o mediante eventos, además de soportar tablas globales, flujos de datos programables y paneles de control interactivos. Es ideal para ingenieros, gerentes y tomadores de decisiones que buscan validar, mejorar o entender mejor sus procesos actuales o futuros.

### **Simio**

Simio es una potente herramienta de simulación y planificación de operaciones basada en objetos. Utiliza un enfoque visual intuitivo de arrastrar y soltar para crear modelos detallados de procesos industriales y logísticos. Es una opción robusta para quienes buscan profundizar en la simulación de eventos discretos.

Finalmente no fue seleccionada para ser utilizada en nuestro proyecto final debido a nuestra menor familiaridad con ella, pero al igual que FlexSim es una herramienta perfectamente válida para representar simulaciones de Cross-docking.

### **Java**

Otra alternativa considerada fue desarrollar un programa personalizado en Java para la simulación, utilizando la librería JavaFX para la visualización de los datos. Este enfoque permitiría recibir parámetros de entrada para la simulación y ofrecer una interfaz gráfica interactiva. Sin embargo, descartamos esta opción debido a la complejidad añadida de crear un software desde cero. El desarrollo implicaría un esfuerzo significativo en

la programación de la lógica de simulación y la creación de interfaces visuales, aumentando el tiempo y los recursos necesarios para el proyecto. Aunque ofrece flexibilidad total, el incremento de complejidad y los desafíos técnicos no justificaban su implementación en esta ocasión.

## 2.4. Algoritmo

Para resolver un problema de cross-docking necesitamos disponer de un escenario, donde se recoja el contexto o planteamiento inicial o lo que denominaremos una instancia, y un algoritmo exacto o metaheurístico que a través de su aplicación, nos permita llegar a un estado final que ofrezca una solución óptima o cercana a la óptima, respectivamente, para nuestro problema. Una solución es óptima cuando conseguimos alcanzamos el mínimo valor posible para el *makespan* o *Cmax*, que empieza cuando llega la primera mercancía del proveedor y acaba cuando se carga la última mercancía en los clientes.

En este trabajo utilizaremos las soluciones obtenidas para instancias de pequeño tamaño con la resolución de un modelo de programación lineal entera mixta o con algoritmos metaheurísticos implementados para este problema en trabajos anteriores. El estudio del modelo y de los algoritmos metaheurísticos está fuera del alcance del presente proyecto, pero indicaremos brevemente qué algoritmos se han utilizado. Específicamente, se han ejecutado algoritmos constructivos para la generación de soluciones iniciales y algoritmos de búsqueda por entornos. Estos algoritmos han demostrado ser eficientes y eficaces en la resolución del CDSP, por lo que proporcionan soluciones de alta calidad que serán usadas durante el proceso de simulación mediante FlexSim. A continuación, se describen brevemente algunas de las ideas utilizadas en dichos algoritmos.

- **Asignación a la puerta con mayor capacidad.** Durante el proceso de construcción de una solución, este algoritmo asigna tanto a proveedores como a clientes a la puerta que tenga mayor capacidad en ese instante. Se ordenan los camiones según la cantidad de pallets que envían o reciben y se asignan a la puerta con mayor capacidad disponible en cada momento, actualizando las capacidades tras cada asignación .
- **Asignación a la puerta con menor capacidad.** Similar al algoritmo constructivo anterior, pero en lugar de asignar los camiones a la puerta con mayor capacidad, se asignan a la puerta con menor capacidad

que aún pueda acomodar el camión. Esto asegura que se utilicen eficientemente las puertas con menor capacidad primero, cumpliendo siempre con las restricciones de capacidad de las puertas.

- **Aleatoriedad en la elección de puertas.** Para generar soluciones diversas en cada ejecución, este algoritmo introduce aleatoriedad en la elección de la puerta. Se ordenan las puertas por capacidad y se elige una puerta aleatoriamente entre las primeras  $k$  puertas con mayor o menor capacidad, según el algoritmo usado. Esto permite obtener distintas soluciones iniciales en cada ejecución, útiles para las metaheurísticas.
- **Asignación de los proveedores en función de los clientes.** Este algoritmo primero asigna los clientes a las puertas de salida y luego asigna los proveedores a las puertas de entrada, teniendo en cuenta la ubicación de los clientes. De esta forma, se intenta minimizar la distancia total de transporte entre proveedores y clientes, mejorando así el valor de la función objetivo.
- **Búsquedas por entornos.** Esta técnica consiste en aplicar movimientos a la solución actual para explorar su entorno en busca de mejoras. Incluye la relocalización de camiones a otras puertas, el intercambio de camiones entre puertas y el intercambio de puertas. Las búsquedas locales pueden ser de tipo voraz (buscando la mejor transición en cada paso), ansiosas (aplicando la primera mejora encontrada), o por sub-entornos (combinando características de las búsquedas voraces y ansiosas) .
- **GRASP:** Es un algoritmo metaheurístico que combina una fase constructiva aleatoria con una fase de mejora mediante búsquedas locales. La fase constructiva genera una solución inicial usando heurísticas, mientras que la fase de mejora busca optimizar esta solución explorando su espacio de búsqueda. GRASP es iterativo, construyendo y mejorando múltiples soluciones hasta encontrar una de alta calidad.

No se hará especial énfasis en que modelo ha sido utilizado para generar las soluciones óptimas ya que no es competencia del trabajo ya que el objetivo es sondear otros comportamientos y variaciones en los agentes que intervienen en la simulación.

## 2.5. Instancias

El contexto o conjunto de parámetros que conforman el planteamiento del *Cross-Dock Scheduling Problem* (CDSP), lo podemos conocer también como instancia, que contiene los parámetros requeridos para obtener las soluciones al problema:

- Conjunto de proveedores (camiones entrantes).
- Conjunto de clientes (camiones salientes).
- Conjunto de puertas de entrada.
- Conjunto de puertas de salida.
- Matriz de flujo entre proveedores y clientes.
- Capacidad de la puerta de entrada.
- Capacidad de la puerta de salida.
- Matriz de distancias entre puertas de entrada y salida.
- Número de pallets que se pueden mover en cada viaje.
- Número total de pallets que envía cada proveedor.
- Número total de pallets que recibe cada cliente.

## 2.6. Solución factible

Una solución factible para el CDSP implica una distribución eficiente de camiones y mercancías entre las puertas de entrada y salida. Esta eficiencia reduce al mínimo el tiempo total de procesamiento en el centro de distribución, abarcando el tiempo de carga, descarga y traslado entre puertas. Según Sayed et al. (2020), en su artículo utilizado como referencia en este proyecto, el problema integrado de asignación de puertas y planificación de camiones (CDSP) busca determinar simultáneamente la asignación de camiones entrantes a puertas de entrada y camiones salientes a puertas de salida. El objetivo es minimizar el tiempo total necesario para procesar todos los camiones, conocido como *makespan* o  $C_{max}$ .

Estas son las principales condiciones clave que una solución óptima debe satisfacer:

1. **Minimización del Recorrido Interno.** La distancia que recorren las mercancías dentro del centro de cross-docking debe ser la menor posible. Esto se logra asignando las puertas de entrada y salida de manera que el trayecto entre ellas sea mínimo, reduciendo así el tiempo y el costo de manipulación de los pallets.
2. **Capacidad de las Puertas.** Es esencial que la asignación de camiones a puertas respete las restricciones de capacidad. Cada puerta tiene un límite en la cantidad de pallets que puede manejar, y una solución óptima debe asegurar que estas capacidades no sean excedidas, garantizando así la viabilidad operativa del centro.
3. **Sincronización de Camiones.** Los camiones de entrada y salida deben estar sincronizados para evitar tiempos de espera innecesarios. Esto implica una planificación eficiente donde los tiempos de llegada y salida estén coordinados, optimizando el flujo continuo de mercancías.
4. **Reducción del Tiempo de Permanencia.** Los productos deben pasar el menor tiempo posible en el cross-dock, idealmente menos de 24 horas. En muchos casos, el tiempo de permanencia puede ser inferior a una hora, lo cual es un indicador de una operación altamente eficiente.

Al implementar estas estrategias, se logra una solución que no solo mejora la eficiencia del cross-docking, sino que también reduce costos operativos y mejora el servicio al cliente final.



# Capítulo 3

## Traza de un modelo de simulación para una instancia de tamaño $8 \times 4$

Se presenta el desarrollo progresivo de la simulación desde su diseño inicial hasta la implementación final. Se documentan los avances y ajustes realizados, los desafíos enfrentados y las soluciones adoptadas para optimizar el rendimiento y la precisión del modelo. El objetivo es proporcionar una visión clara del proceso de construcción de la simulación, sirviendo como registro del proyecto y guía para futuros trabajos en simulación dentro del ámbito de la ingeniería.

### 3.1. Conociendo FlexSim

La etapa inicial del trabajo consistió en la realización de pruebas con modelos simples y con un número reducido de elementos. El objetivo de estas pruebas era familiarizarse con los agentes del sistema y comprender su comportamiento e interacción.

Las primeras simulaciones se diseñaron con componentes básicos y fáciles de manejar, permitiendo así un entendimiento progresivo de la dinámica de FlexSim. Durante este proceso inicial, se experimentó con diferentes configuraciones y se observó cómo los elementos interactuaban entre sí en un entorno controlado. Esto proporcionó una base sólida para abordar modelos más complejos en etapas posteriores del proyecto.

A continuación, se detallan los principales elementos que se utilizaron en FlexSim y su funcionalidad dentro del sistema:

- **Source.** El elemento source es el punto de entrada de objetos en el sistema de simulación. Configurar adecuadamente las fuentes permite definir la tasa de llegada de objetos y otras características iniciales, lo cual es crucial para representar adecuadamente el flujo del sistema.
- **Conveyors.** Los transportadores son utilizados para mover objetos

de un lugar a otro dentro de la simulación. Estos elementos son esenciales para representar procesos de producción o líneas de montaje, donde los objetos necesitan ser trasladados de manera continua o intermitente.

- **Queues.** Las colas son elementos fundamentales en la simulación que permiten gestionar el flujo de objetos. En FlexSim, las *queues* almacenan temporalmente los objetos hasta que puedan ser procesados por otros agentes del sistema. Su capacidad y reglas de operación pueden configurarse según las necesidades del modelo.
- **TaskExecuters.** Los ejecutores de tareas son agentes que realizan acciones específicas en la simulación, como el transporte de objetos o la ejecución de procesos. Pueden ser configurados para llevar a cabo tareas según ciertos criterios, como tiempo, condiciones del sistema o eventos específicos.
- **Sinks.** Los sumideros son los puntos de salida de los objetos del sistema. Los *sinks* permiten medir la eficiencia del sistema y la cantidad de objetos procesados a lo largo del tiempo, proporcionando métricas importantes para el análisis del rendimiento de la simulación.

Estos componentes básicos fueron la base sobre la cual se construyeron las simulaciones iniciales. La familiarización con estos elementos y su correcta configuración fue un paso crucial en el desarrollo del proyecto, permitiendo avanzar hacia la creación de modelos más sofisticados y representativos de sistemas reales.

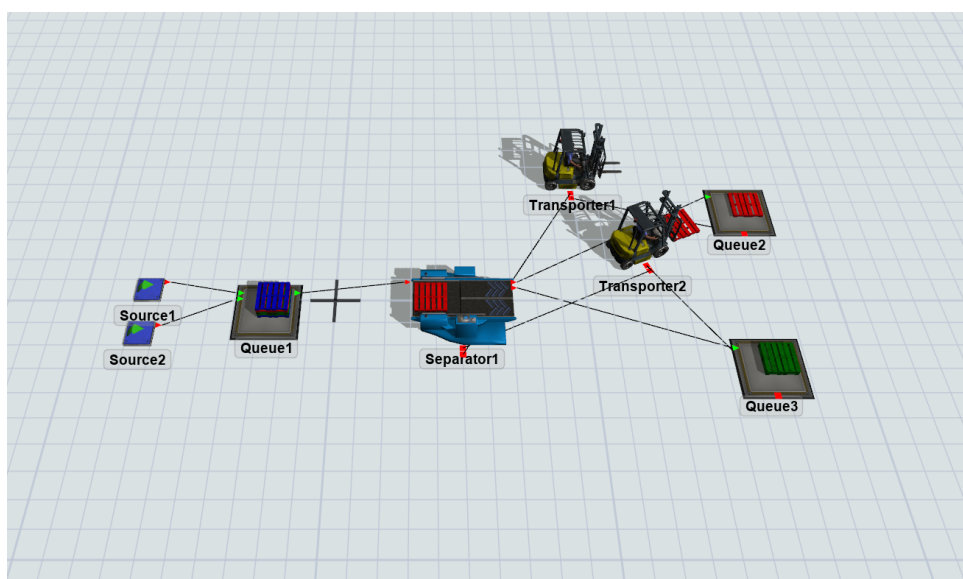


Figura 3.1: Primeros pasos en el desarrollo de la simulación.

## 3.2. Primera etapa

La primera etapa del desarrollo de la simulación se centró en crear un modelo básico, pero funcional, que permitiera entender las dinámicas iniciales del sistema. El modelo resultante se estructuró como se muestra en la Figura 3.2. A continuación, se explicarán brevemente los elementos utilizados:

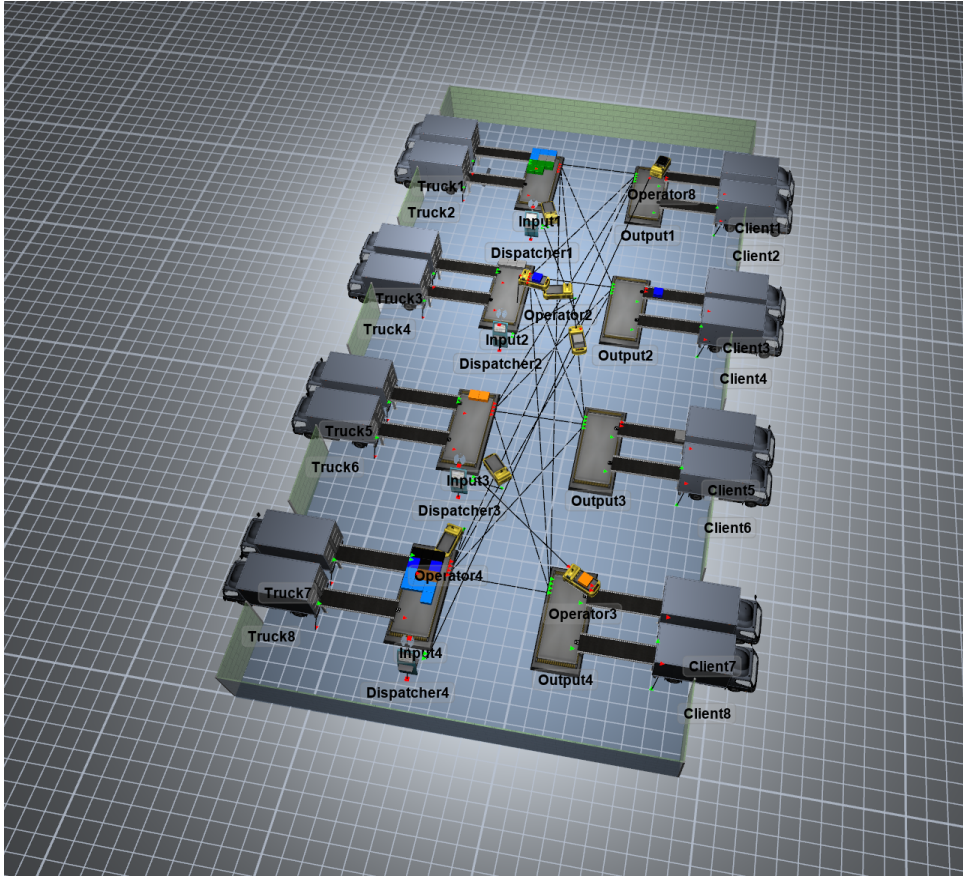


Figura 3.2: Primera Etapa de Desarrollo del Modelo Final

### 1. Camiones Proveedores y Clientes como *Sources* y *Sinks*

- Los camiones proveedores, representados en el modelo como *Truck1* a *Truck8*, fueron configurados como elementos de entrada, o *sources*. Estos camiones tienen la función de introducir mercancías en el sistema.
- Los clientes, etiquetados como *Client1* a *Client8*, fueron definidos como elementos de salida, o *sinks*. Estos puntos representan el destino final de las mercancías que son transportadas y distribuidas a lo largo del sistema.

### 2. Tablas de Mercancías y Etiquetado de Información

- Cada camión tiene una tabla asignada que contiene las mercancías que debe transportar. Estas tablas son fundamentales para la correcta gestión y distribución de los productos dentro del sistema.
- Las mercancías están etiquetadas con información relevante del cliente al que deben ser entregadas. Este etiquetado es crucial para que los operadores puedan identificar y diferenciar las mercancías de acuerdo con su destino específico.

### 3. **TaskExecuters Asignados a las Colas de Entrada**

- Las colas de entrada, marcadas en el modelo como *Input1* a *Input4*, tienen asignados *taskexecuters*, cuya función es realizar el transporte de la mercancía desde los camiones proveedores hasta los puntos de salida.
- Estos *taskexecuters* actúan como operadores dentro del sistema, asegurando que las mercancías sean movidas de manera eficiente y lleguen a su destino correspondiente.

Como hemos visto, esta etapa se centró en establecer una base sólida mediante la creación de un modelo que integrara los elementos fundamentales de FlexSim; proceso esencial para comprender el comportamiento del sistema, destapar problemas intrínsecos del modelo y preparar el terreno para futuras mejoras y complejidades en el modelo de simulación.

### 3.3. **Modelo Final**

Después de los evolutivos adheridos al modelo llegamos al modelo final de la simulación donde veremos que se han incluido mejoras significativas que aumentan tanto la precisión como la representatividad del sistema. En la Figura 3.3 se pueden observar el modelo en medio de una simulación, el *process flow* que utiliza y algunos recursos utilizados como grupos, listas globales, tablas, etc.

1. **Sustitución de *Sources* y *Sinks* por operadores en movimiento para el modelo de los camiones.** En esta etapa, los camiones estáticos fueron reemplazados por operadores en movimiento que utilizan plantillas visuales de camiones. Este cambio permite alternar los camiones en las puertas, creando un modelo mucho más representativo del sistema de cross-docking. Esta mejora visual y funcional proporciona una mejor comprensión de la dinámica del sistema y facilita la observación de flujos y operaciones.

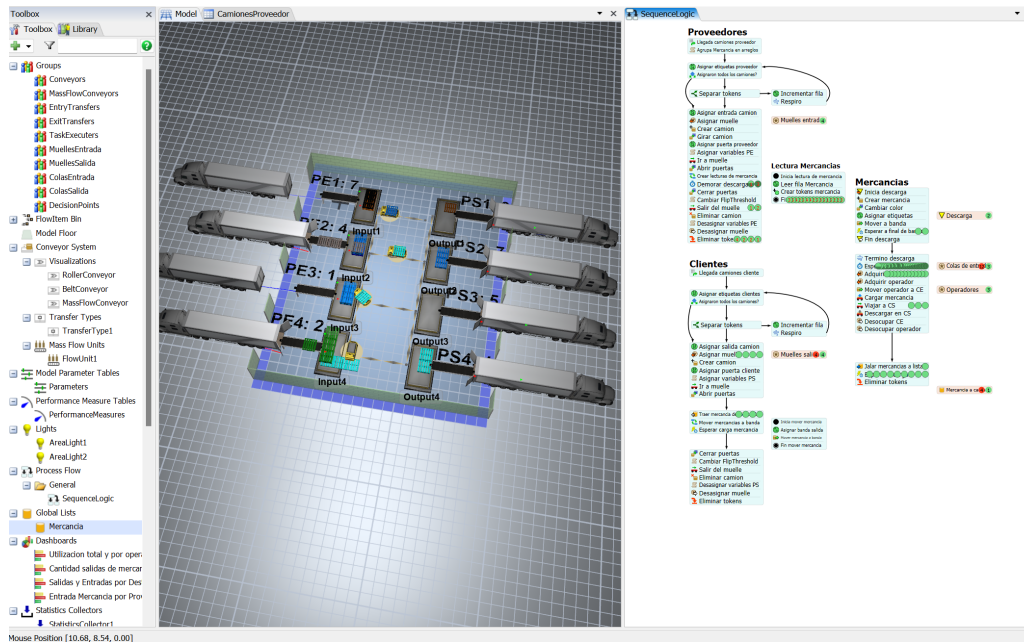


Figura 3.3: Vista General del Modelo Final

2. **Definición de Rutas Guiadas para TaskExecuters.** Para optimizar los tiempos de transporte de mercancías, se definieron rutas guiadas utilizando varias herramientas avanzadas de FlexSim:

- **El Grid.** Una herramienta que permite crear una cuadrícula sobre el área de trabajo, facilitando la alineación y distribución de elementos y rutas.
- **Navigator.** Utilizado para establecer y gestionar rutas específicas que los operadores deben seguir, asegurando que el transporte de mercancías sea eficiente y ordenado.
- **Mandatory Path.** Esta propiedad asegura que los operadores sigan rutas predefinidas, evitando desviaciones y optimizando los tiempos de transporte conforme a las soluciones óptimas del modelo.

3. **Implementación de una Secuencia Lógica Compleja.** A medida que el modelo aumentó en complejidad, fue necesario implementar una secuencia lógica avanzada utilizando el *Process Flow* de FlexSim. Esta secuencia se basa en los siguientes elementos:

- **Tokens.** Elementos que representan la unidad básica de la simulación de procesos. Los *tokens* se mueven a través de los nodos del *Process Flow*, activando eventos y desencadenando acciones.
- **Triggers.** Utilizados para iniciar o controlar eventos específicos dentro de la simulación, basados en condiciones predefinidas.

- **Groups.** Conjuntos de elementos o *tokens* que pueden ser gestionados colectivamente, permitiendo la ejecución de operaciones en masa o la coordinación de actividades.
- **Global Lists.** Estructuras que permiten almacenar y gestionar datos accesibles desde cualquier parte del modelo, facilitando la comunicación y sincronización entre diferentes componentes de la simulación.
- **Global Tables.** Tablas de datos que contienen información crítica utilizada por diversos elementos del modelo para tomar decisiones o ejecutar acciones. Estas tablas pueden incluir desde listas de mercancías hasta horarios de operación.

## Process Flow

El *Process Flow* en FlexSim es una herramienta esencial para modelar y gestionar procesos mediante diagramas de flujo visuales. Permite definir y optimizar cada etapa del proceso utilizando nodos y conexiones, proporcionando una representación clara de las actividades y decisiones del sistema. Esta funcionalidad es crucial para crear simulaciones precisas que reflejen la realidad operativa.

Hablaremos de los principales elementos 3.4 que pueden ser utilizados para generar un *Process Flow* en *FlexSim*, estos se utilizan sobretodo para modelar, gestionar y optimizar los procesos de una simulaciones. De la misma forma podemos agruparlos segun su cometido para facilitar su identificación:

- **Creación de Tokens:** Estos nodos son esenciales para generar tokens, que representan las unidades de trabajo dentro del proceso. Los tokens pueden ser creados de diversas maneras, incluyendo la generación basada en eventos, programación de tiempos y activación manual.
- **Elementos básicos:** Incluyen nodos fundamentales como contadores, temporizadores, almacenamiento de variables, y operaciones matemáticas. Estos nodos se utilizan para controlar el flujo y la lógica de los procesos.
- **Subflujo:** Permiten la creación de subprocesos dentro del flujo principal. Estos son útiles para modularizar y organizar el modelo, mejorando la claridad y la reutilización de componentes.

- **Elementos visuales:** Ayudan a visualizar el estado y el progreso de los tokens y otros elementos del proceso. Incluyen iconos para representar la creación y movimiento de mercancías.
- **Objects:** Representan elementos físicos o lógicos en el proceso, como estaciones de trabajo, almacenamientos y transportadores.
- **Secuencias de Tareas:** Esenciales para definir las secuencias de tareas que deben seguir los operadores y otros recursos en el modelo. Incluyen la asignación, inicio y finalización de tareas.
- **Shared Assets:** Incluyen elementos que pueden ser utilizados por múltiples partes del proceso, como recursos compartidos, señales y rutas de transporte.



Figura 3.4: Elementos del Process Flow de FlexSim



## Implementación

Recordemos que el objetivo de este proyecto es el diseño de simulaciones de un centro de operaciones de recursos compartidos *Cross-docking* y con este objetivo hemos utilizado el flujo de procesos que nos ofrece esta potente herramienta. Se ha hecho principal incapié en gestionar la efectividad de las llegadas, procesamiento y salida de mercancías, de esta misma forma podemos separar el diseño del flujo de procesos en tres secciones:

### ■ Camiones Proveedores:

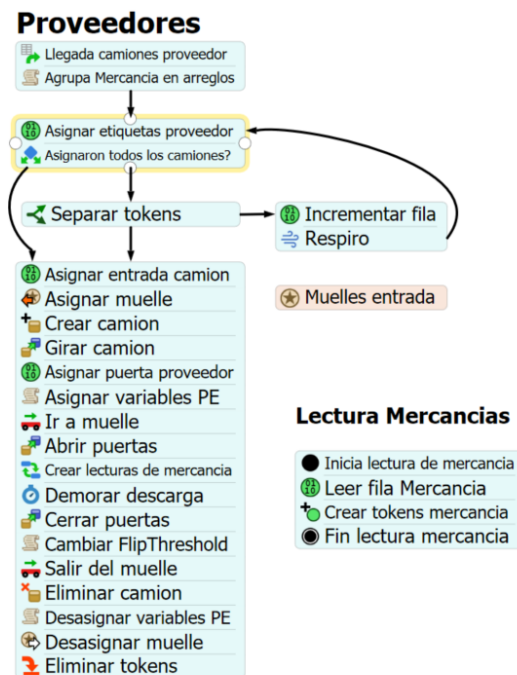


Figura 3.5: Flujo de Proveedores

1. **Llegada y Agrupación de Camiones:** Los camiones proveedores llegan al centro de cross-docking y las mercancías se agrupan en arreglos específicos.
2. **Asignación y Separación de Tokens:** Se asignan etiquetas a cada proveedor y se verifica si todos los camiones han sido asignados. Posteriormente, los tokens se separan para iniciar el procesamiento individual.
3. **Asignación de Recursos y Movimiento al Muelle:** Se asignan camiones y muelles disponibles, se crea un nuevo camión y se gira para alinearse con la puerta asignada. Se establecen variables específicas del proveedor y los camiones se dirigen al muelle.



4. **Lectura y Descarga de Mercancías:** Se inicia la lectura de mercancías con la creación de tokens específicos. Esta etapa es crucial para registrar y verificar el estado de cada ítem antes de proceder a su descarga y posterior despacho. Tras finalizar la lectura, se procede a la descarga.
5. **Salida del Muelle:** Una vez completada la descarga, las puertas se cierran y el camión sale del muelle. Se eliminan las variables y los tokens asociados al proveedor.

■ **Mercancías:**



Figura 3.6: Flujo de transporte de mercancías

1. **Descarga y Procesamiento:** Se inicia la descarga de mercancías, se crean las mercancías y se asignan etiquetas. Posteriormente, las mercancías se mueven a la banda transportadora.
2. **Finalización de la Descarga:** Se espera a que el camión se retire, se adquieren recursos necesarios como operadores y se realizan movimientos operativos para completar el proceso de descarga y cargar las mercancías en camiones clientes.

3. **Cargar y Viajar a Camiones Clientes:** Las mercancías se cargan en los camiones de clientes y se procede con el viaje a los puntos de salida, completando la etapa de descarga en el cliente.

■ **Camiones Clientes:**

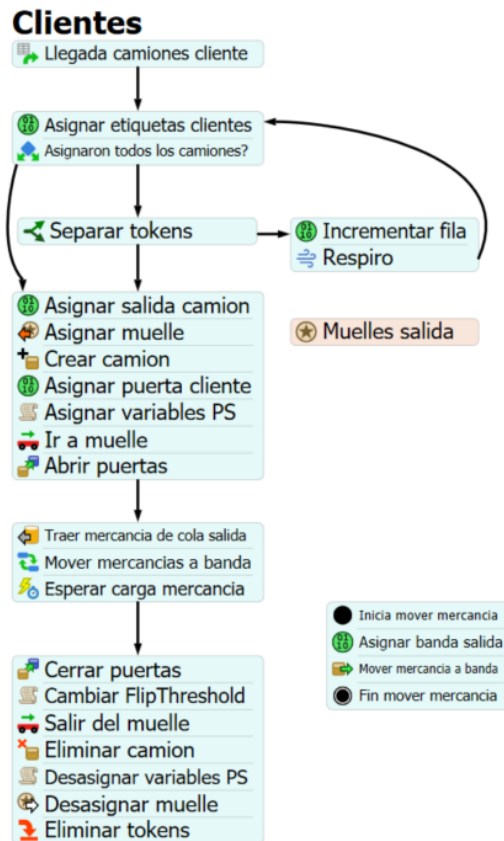


Figura 3.7: Flujo de Camiones Clientes

1. **Llegada y Agrupación de Camiones de Clientes:** Similar a los proveedores, los camiones de clientes llegan y se agrupan. Se asignan etiquetas y se verifica la asignación completa de los camiones.
2. **Asignación y Movimiento al Muelle:** Se asignan camiones y muelles, se crean los camiones necesarios y se alinean con la puerta del cliente. Las variables del cliente se establecen y los camiones se dirigen al muelle.
3. **Proceso de Carga:** Las puertas se abren, y se trae mercancía de la cola de salida para moverla a la banda transportadora y cargar los camiones clientes.

4. **Finalización del Proceso:** Tras cargar las mercancías, las puertas se cierran y el camión sale del muelle. Se eliminan las variables y los tokens asociados al cliente, completando el ciclo operativo.

### 3.4. Visualizar los resultados

Los resultados de la simulación se presentan de manera visual y tabular a través de dashboards y tablas. Estas herramientas son esenciales para analizar el rendimiento del sistema y tomar decisiones informadas para mejorar las operaciones. A continuación, se describen los principales componentes de los dashboards y tablas utilizados en la simulación del centro de cross-docking.

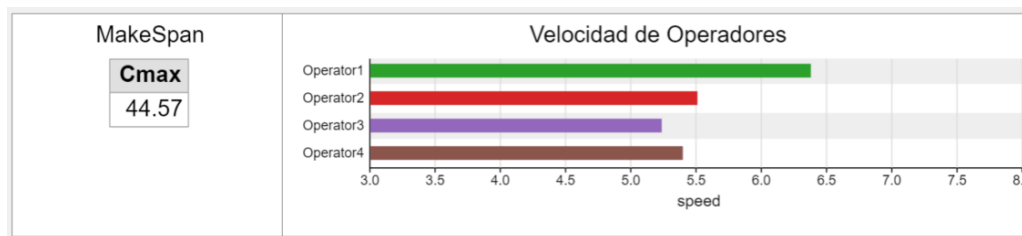


Figura 3.8: Gráficas de Makespan y Velocidad de Operadores

- **Velocidad de Operadores:** Gráfico de barras que representa la velocidad de los operadores que son utilizados en el sistema, la utilidad está en permitir visualizar rápidamente la eficiencia de cada operador en términos de velocidad y diferenciar la velocidad de desplazamiento individual, facilitando la identificación de posibles cuellos de botella o áreas de mejora.
- **Indicador de MakeSpan:** Este indicador muestra el tiempo total ( $C_{max}$ ) necesario para completar todas las operaciones en el sistema en las respectivas unidades de tiempo. Este valor es crucial para medir el rendimiento global del sistema y comparar diferentes configuraciones o estrategias de operación.
- **Entradas y Salidas de Mercancías:** Tabla detallada que muestra las entradas y salidas de mercancías. Esta tabla incluye la siguiente información:
  - **Proveedor:** Número del proveedor que entrega la mercancía.
  - **Tiempo de Entrada:** Momento en el que la mercancía entra al sistema.

- **Cliente:** Número del cliente que recibe la mercancía.
- **Puerta de Salida:** Puerta asignada para la salida de la mercancía.
- **Tiempo de Salida:** Momento en el que la mercancía sale del sistema.
- **Duración:** Tiempo total que la mercancía permanece en el sistema.

Proveedor	TiempoEntrada	Cliente	PuertaSalida	TiempoSalida	Duracion
8	2	1	4	16	14
5	2	7	2	11	9
3	2	1	4	10	8
6	2	4	1	6	4
8	3	1	4	20	18
5	3	7	2	13	11
3	3	1	4	13	11
8	4	1	4	23	21
5	4	7	2	15	13
3	4	1	4	15	13
8	5	3	1	25	23
5	5	7	2	16	14
3	5	1	4	18	16
2	5	1	4	18	16
8	6	3	1	28	26
5	6	7	2	18	16
3	6	1	4	20	18
2	6	1	4	20	18
8	7	4	1	30	28
5	7	8	1	19	17
3	7	3	1	23	21

Figura 3.9: Tabla de tiempos de entrada y Salida de Mercancías

Esta tabla es crucial para llevar un registro detallado de todas las operaciones de entrada y salida, permitiendo contrastar los datos teóricos y llevar un análisis exhaustivo del flujo de mercancías.

- **Utilización Total y por Operador:** dos gráficos de barras horizontales que muestran la utilización total y la utilización específica por operador. Estos gráficos descomponen el tiempo de actividad de los operadores en varias categorías:
  - **Travel empty:** Tiempo viajando sin carga.
  - **Travel loaded:** Tiempo viajando con carga.
  - **Idle:** Tiempo inactivo.
  - **Blocked:** Tiempo bloqueado, sin poder realizar tareas.
  - **Utilización Total:** Muestra el porcentaje total de tiempo en cada categoría para todos los operadores combinados.
  - **Utilización Total y por Operador:** Desglosa el porcentaje de tiempo en cada categoría para cada operador individualmente.

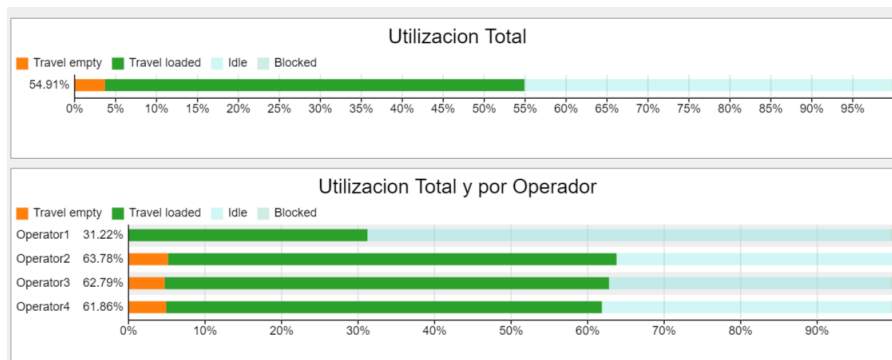


Figura 3.10: Utilización de Operadores

# Capítulo 4

## Resultados de la simulación

En este capítulo veremos la traza de una solución aplicada en la simulación y los resultados obtenidos tras su modificación.

### 4.1. Modelo 4x8-2

#### Datos contemplados de la instancia

- Información general:

<b>Modulo</b>	<b>8x4x5x25_2</b>
Camiones Entrantes	8
Camiones Salientes	8
Puertas entrantes	4
Puertas salientes	4

- Matriz de pallets enviados desde el proveedor al cliente:

<b>Proveedor / Clientes</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
1	2	0	0	0	0	4	0	0
2	0	0	0	4	5	0	0	0
3	5	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	3	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	5	3
6	0	0	1	0	0	0	0	0
7	5	0	0	0	0	0	0	0
8	3	0	2	2	0	0	5	0

- Matriz distancia entre puertas:

<b>Entrada / Salida</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
1	1	2	3	4
2	2	1	2	3
3	3	2	1	2
4	4	3	2	1

- Suma pallets enviados por proveedor:

<b>Proveedor</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>Total</b>
	6	13	7	3	8	1	5	12	55

- Suma pallets recibidos por cliente:

<b>Cliente</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>Total</b>
	14	5	4	3	7	5	14	3	55

- Capacidad puertas entrantes:

<b>Puertas entrantes</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
	15	15	15	15

- Capacidad puertas salientes:

<b>Puertas salientes</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
	15	15	15	15

## Solución Óptima

- $C_{max}$  (Tiempo total):

<b><math>C_{max}</math> (Tiempo total)</b>	35
--	----

- Asignación de Camiones proveedores a puertas de entrada:

<b>Proveedor</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
Puerta	3	2	1	4	3	2	1	2
Final de Servicio	13	14	7	15	8	1	13	12

- Asignación de Camiones clientes a puertas de salida:

<b>Cliente</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
Puerta	4	1	1	3	3	2	1	
Final de Servicio	35	25	20	31	30	35	35	28

- Orden de proveedores por puerta de entrada:

<b>Puerta / Orden</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>
Puerta 1	5	7
Puerta 2	8	4
Puerta 3	3	1
Puerta 4	6	2

- Orden de clientes por puerta de salida:

<b>Puerta / Orden</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>	<b>4º</b>
Puerta 1	1	7	6	2
Puerta 2	5	4	8	
Puerta 3	3			
Puerta 4				



## Visualización de la traza

La correcta lectura de la solución óptima teórica puede ser leída a través de la Figura 4.1.

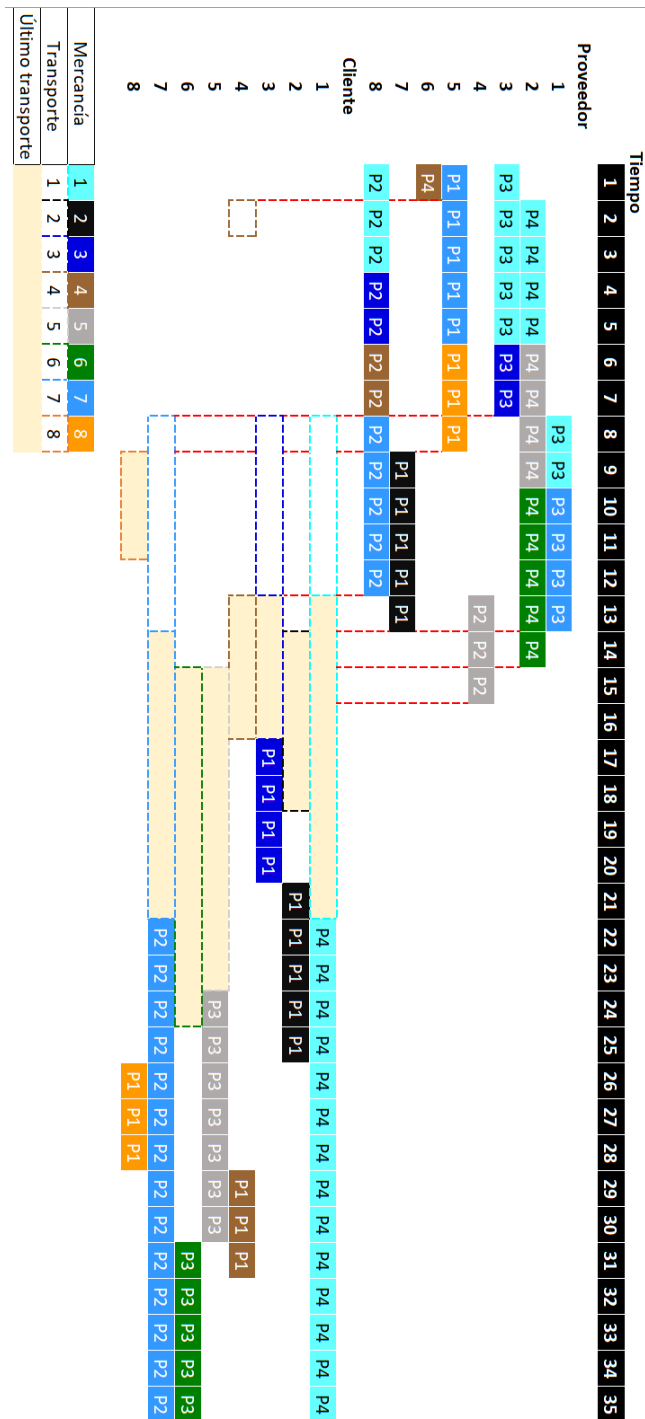


Figura 4.1: Traza de la Solución Óptima del modulo 8x4-2

## 4.2. Resultados de la Simulación

La Tabla 4.1 muestra los datos arrojados por la simulación:

Proveedor	TiempoEntrada	Cliente	PuertaSalida	TiempoSalida
1	9	1	4	27
1	10	7	2	36
2	6	1	4	21
2	10	5	3	30
2	15	6	3	41
3	4	1	4	17
3	6	3	1	22
4	15	5	3	35
5	4	7	2	16
5	7	8	1	19
6	0	4	1	4
7	12	2	1	25
8	2	1	4	20
8	4	3	1	25
8	6	4	1	33
8	11	7	2	42

Tabla 4.1: Entradas y Salidas de Mercancías

Como vemos, en contraste con los resultados ofrecidos por el modelo matemático que propociona la solución óptima para la instancia considerada, existen ciertas diferencias en cuanto a los tiempos aunque se aproximan bastante. Los principales motivos para esto son:

- Algunos movimientos tienen una lógica de transporte poco realista y difícilmente aplicable en un modelo real.
- Transportar modelos de forma sincronizada al mismo tiempo desde una cola.
- No contar con elementos transportadores entre camiones y operadores como colas o conveyors.

### 4.2.1. Utilización de operadores

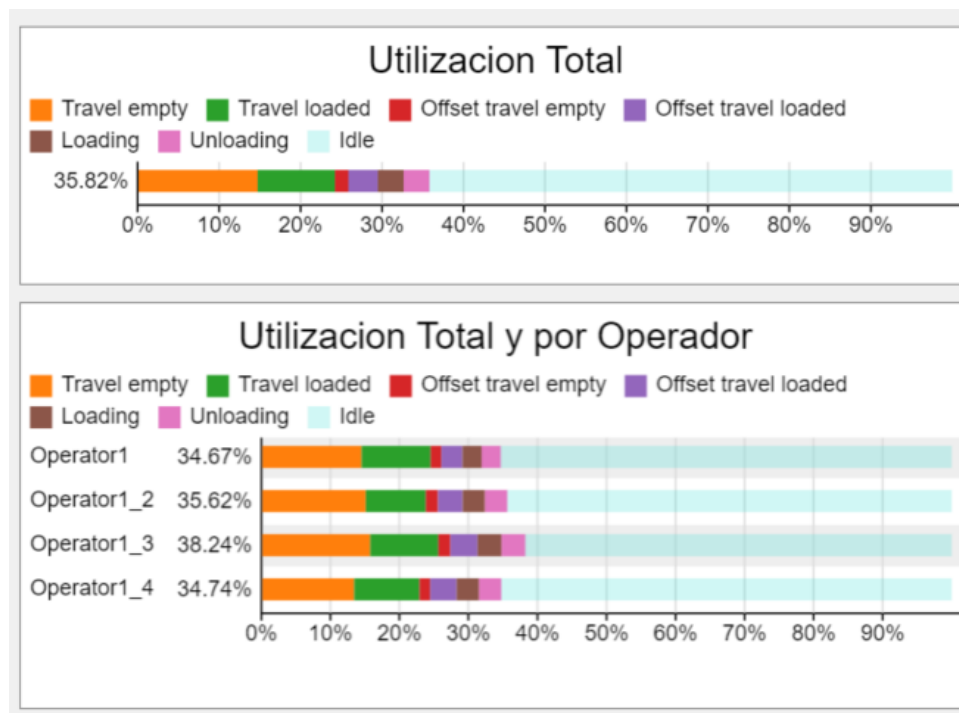


Figura 4.2: Tiempo de uso de operadores

#### ■ Alta Proporción de Tiempo Inactivo:

- Una parte significativa del tiempo de los operadores se encuentra en estado inactivo (*Idle*). Esto principalmente se debe a que el modelo sigue recogiendo datos incluso cuando la gran parte de los camiones han acabado sus gestiones, aunque esto también puede dejar entrever que hay potencial para mejorar la asignación de tareas y reducir el tiempo de inactividad.

#### ■ Desbalance en el Viaje Vacío y con Carga:

- Los operadores pasan una cantidad significativa de tiempo viajando vacíos en comparación con el tiempo de viaje con carga. Esto indica una posible ineficiencia en la planificación de rutas o la distribución de tareas, lo cual podría ser optimizado para reducir los viajes innecesarios.

#### ■ Variabilidad entre Operadores:

- Existe una variabilidad en la utilización del tiempo entre los diferentes operadores. Mientras que algunos operadores tienen una mayor proporción de tiempo viajando vacío, otros pasan más tiempo en tareas de carga y descarga. Esto puede indicar diferencias

en la asignación de tareas o en la productividad individual de los operadores.

En resumen, los datos del dashboard revelan áreas clave donde se puede mejorar la eficiencia operativa, como reducir el tiempo inactivo, optimizar la planificación de rutas para minimizar viajes vacíos y equilibrar mejor la carga de trabajo entre los operadores. Implementar mejoras en estas áreas puede conducir a una operación más eficiente y productiva del centro de cross-docking.

### 4.3. Alteraciones en el Modelo

Para analizar cómo las alteraciones en los operadores del modelo pueden afectar la efectividad del sistema, se han propuesto diferentes variaciones en el mismo. Estas variaciones incluyen:

- **Diferencias de velocidades entre los operadores:** Se ha modificado la velocidad de los operadores aplicando una distribución normal aleatoria para las velocidades individuales. Esto permite evaluar cómo las diferencias en la velocidad pueden influir en el rendimiento global del sistema.

Otros cambios propuestos:

- **Diferentes capacidades de carga de los operadores:** Introducir variaciones en la capacidad de carga de los operadores para observar cómo estas diferencias impactan en la eficiencia del manejo de mercancías.
- **Alteración de la capacidad de mercancías de las puertas:** Ajustado la capacidad de las puertas para manejar diferentes cantidades de mercancías, con el objetivo de examinar cómo estas alteraciones afectan el flujo y la gestión de las mercancías.

Para poner a prueba estos cambios, se han realizado simulaciones repetidas, recreando las condiciones del modelo una cantidad significativa de veces. Este enfoque permite obtener una comprensión profunda de cómo las variaciones introducidas influyen en la efectividad del sistema, proporcionando datos valiosos para la optimización de las operaciones en el centro de cross-docking.

## Resultados

Muestra de 1000 ejecuciones del modelo.

### ■ Diagrama de Cajas de Velocidades observadas:

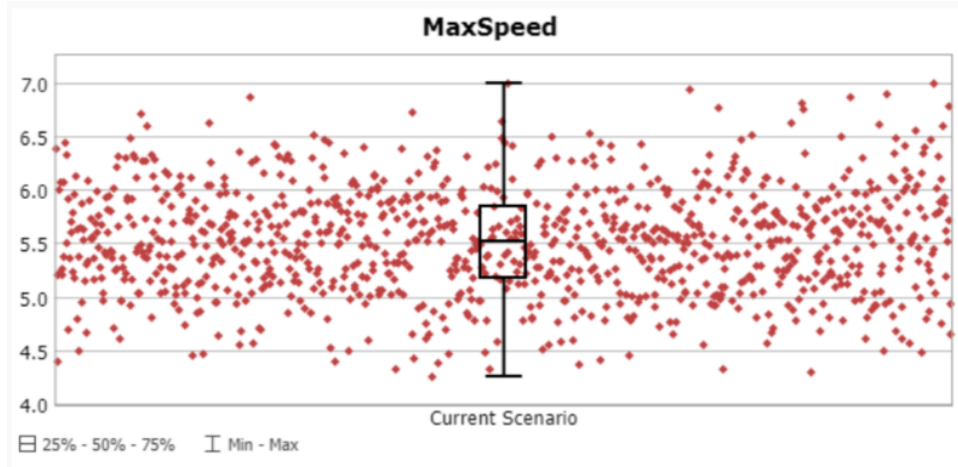


Figura 4.3: Diagrama de Cajas de Velocidades -Muestra de 1000

### ■ Diagrama de Cajas de Cmax observados:

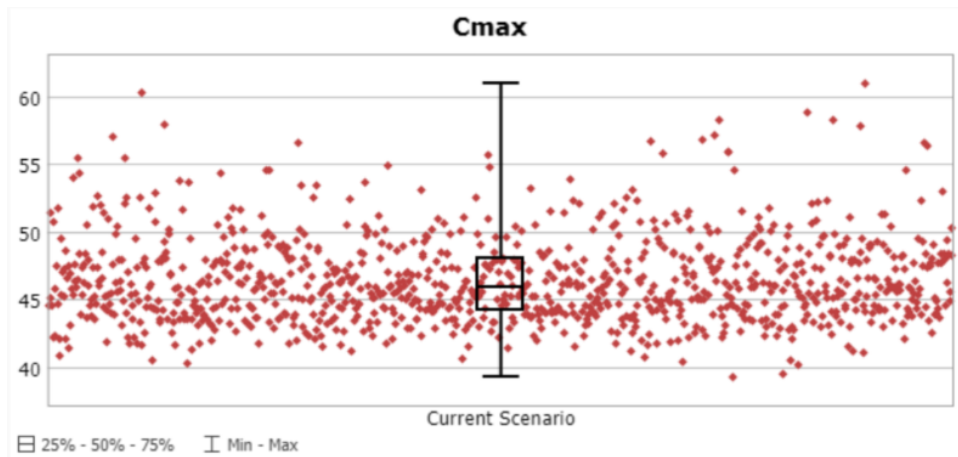


Figura 4.4: Diagrama de Cajas de Cmax - Muestra de 1000

### ■ Media de los datos:

MaxSpeed	Cmax
5.52	46.41

Tabla 4.2: Valores de MaxSpeed y Cmax

# Capítulo 5

## Conclusiones y líneas futuras

### 5.1. Conclusiones

En este proyecto, hemos abordado el desafío de optimizar las operaciones del *Cross-Dock Scheduling Problem - CDSP* utilizando simulaciones detalladas con FlexSim. El principal objetivo era mejorar la eficiencia operativa y reducir el tiempo de inactividad de los operadores, así como minimizar los viajes vacíos. A continuación, se resumen las principales conclusiones obtenidas:

- **Reducción de Tiempos Inactivos:** A través de las simulaciones, se observó que una parte significativa del tiempo de los operadores estaba en estado inactivo. Esto sugirió que hay un gran potencial para mejorar la asignación de tareas y reducir el tiempo de inactividad, lo cual podría incrementar significativamente la productividad del centro.
- **Optimización de Rutas:** La planificación de rutas mostró ser un área clave para la mejora. Al reducir los viajes vacíos, se puede incrementar la eficiencia operativa. Las rutas guiadas y el uso del *Navigator* en FlexSim demostraron ser herramientas útiles para esta optimización.
- **Variabilidad en la Productividad de los Operadores:** Se identificaron diferencias significativas en la utilización del tiempo entre los diferentes operadores. Este hallazgo sugiere la necesidad de un análisis más profundo y posible reentrenamiento o redistribución de las tareas para equilibrar mejor la carga de trabajo.
- **Impacto de las Alteraciones en el Modelo:** Las variaciones en la velocidad de los operadores y en la capacidad de carga mostraron cómo pequeñas alteraciones pueden influir en el rendimiento global

del sistema. Esto subraya la importancia de considerar estas variables al planificar las operaciones.

## 5.2. Líneas Futuras

Las simulaciones realizadas han abierto varias vías para futuras investigaciones y mejoras en la gestión de centros de cross-docking. Algunas de las propuestas incluyen:

- **Implementación de Algoritmos Avanzados:** Explorar el uso de algoritmos de inteligencia artificial y aprendizaje automático para mejorar aún más la planificación de rutas y la asignación de tareas.
- **Integración de Nuevas Tecnologías:** Evaluar la integración de tecnologías emergentes como vehículos autónomos y sistemas de Internet de las Cosas (IoT) para mejorar la comunicación y coordinación dentro del centro.
- **Simulaciones en Entornos Más Complejos:** Ampliar las simulaciones para incluir más variables y condiciones realistas, como fluctuaciones en la demanda y diferentes tipos de mercancías, para obtener un modelo más robusto y adaptable.
- **Estudio de la Sostenibilidad:** Analizar cómo las mejoras en la eficiencia operativa pueden contribuir a la reducción de emisiones de carbono y otros impactos ambientales, promoviendo operaciones más sostenibles.

En conclusión, este proyecto ha demostrado que mediante el uso de simulaciones detalladas y herramientas avanzadas como FlexSim, es posible identificar y abordar áreas clave de mejora en las operaciones de cross-docking. Las futuras investigaciones y desarrollos en esta área tienen el potencial de llevar estas mejoras a niveles aún más altos de eficiencia y sostenibilidad.

# Capítulo 6

## Summary and Conclusions

### 6.1. Conclusions

In this project, we tackled the challenge of optimizing operations at cross-docking centers using detailed simulations with FlexSim. Our main goals were to improve operational efficiency, reduce operator idle time, and minimize empty travel. Here are the main conclusions we reached:

- **Reduction of Idle Times:** Through simulations, it was observed that a significant portion of the operators' time was idle. This suggests a great potential for improving task allocation and reducing idle time, which could significantly increase the productivity of the center.
- **Route Optimization:** Route planning proved to be a key area for improvement. By reducing empty travel, operational efficiency can be increased. Guided routes and the use of the *Navigator* in FlexSim have proven to be useful tools for this optimization.
- **Variability in Operator Productivity:** Significant differences were identified in the utilization of time among different operators. This finding suggests the need for a deeper analysis and possible retraining or redistribution of tasks to better balance the workload.
- **Impact of Model Alterations:** Variations in operator speed and load capacity showed how small changes can influence the overall system performance. This underscores the importance of considering these variables when planning operations.



## 6.2. Future Lines of Work

The simulations we conducted have highlighted several opportunities for future research and improvements in managing cross-docking centers. Some of the proposals include:

- **Implementation of Advanced Algorithms:** Explore the use of artificial intelligence and machine learning algorithms to further improve route planning and task allocation.
- **Integration of New Technologies:** Evaluate the integration of emerging technologies such as autonomous vehicles and Internet of Things (IoT) systems to enhance communication and coordination within the center.
- **Simulations in More Complex Environments:** Expand simulations to include more variables and realistic conditions, such as fluctuations in demand and different types of goods, to obtain a more robust and adaptable model.
- **Study of Sustainability:** Analyze how improvements in operational efficiency can contribute to the reduction of carbon emissions and other environmental impacts, promoting more sustainable operations.

In conclusion, this project has shown that by using detailed simulations and advanced tools like FlexSim, we can find and improve important areas in cross-docking operations. Future research and developments in this field could make these improvements even more efficient and sustainable.

# Capítulo 7

## Presupuesto

El presupuesto de este trabajo consta principalmente del coste de personal, teniendo en cuenta el número de horas requeridas para el desarrollo del mismo. El cálculo del tiempo se realiza en base a la duración del proyecto, 300 horas, acorde con lo establecido en la Resolución de 21 de marzo de 2011, de la Universidad de La Laguna.

### Coste de Personal

<b>Concepto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Coste (€)</b>
Horas de trabajo	300 horas a 25€/hora	7,500
<b>Total Coste de Personal</b>		<b>7,500</b>

Tabla 7.1: Coste de Personal

### Costes de Materiales y Herramientas

<b>Concepto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Coste (€)</b>
Licencia de software	FlexSim	1,200
Hardware	Computadora y periféricos	800
Material de oficina	Papel, tinta, etc.	100
<b>Total Coste de Materiales y Herramientas</b>		<b>2,100</b>

Tabla 7.2: Coste de Materiales y Herramientas

## Otros Costes

<b>Concepto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Coste (€)</b>
Gastos de desplazamiento	Visitas a centros de Cross-Docking	300
Imprevistos	Contingencias	200
<b>Total Otros Costes</b>		<b>500</b>

Tabla 7.3: Otros Costes

## Coste Total del Proyecto

<b>Concepto</b>	<b>Coste (€)</b>
Coste de Personal	7,500
Coste de Materiales y Herramientas	2,100
Otros Costes	500
<b>Total</b>	<b>10,100</b>

Tabla 7.4: Coste Total del Proyecto

# Bibliografía

- Acar, K., Yalcin, A., Yankov, D., 2012. Robust door assignment in less-than-truckload terminals. *Computers Industrial Engineering* 63, 729–738. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.04.008>.
- Boysen, N., Briskorn, D., Tschöke, M., 2013. Truck scheduling in cross-docking terminals with fixed outbound departures. *OR Spectrum* 35, 479 – 504. doi:[10.1007/s00291-012-0311-6](https://doi.org/10.1007/s00291-012-0311-6).
- Expósito-Izquierdo, C., Expósito-Márquez, A., Melián-Batista, B., Moreno-Pérez, J., Moreno-Vega, J., 2022. Intelligent collaborative freight distribution to reduce greenhouse gas emissions: A review. *Studies in Computational Intelligence* 1036, 133–142. doi:[10.1007/978-3-030-97344-5\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-97344-5_9).
- FlexSim Software Products, I., 2024. FlexSim Software. URL: <https://www.flexsim.com>. disponible en: <https://www.flexsim.com>.
- Gelareh, S., Glover, F., Guemri, O., 2020. A comparative study of formulations for a cross-dock door assignment problem. *Omega* 91, 102015.
- Konur, D., Golias, M.M., 2013. Analysis of different approaches to cross-dock truck scheduling with truck arrival time uncertainty. *Computers and Industrial Engineering* 65, 663 – 672. doi:[10.1016/j.cie.2013.05.009](https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.05.009).
- Kuo, Y., 2013. Optimizing truck sequencing and truck dock assignment in a cross docking system. *Expert Systems with Applications* 40, 5532–5541.
- Ladier, A., Alpan, G., 2014. Crossdock truck scheduling with time windows: Earliness, tardiness and storage policies. *Journal of Intelligent Manufacturing* doi:[10.1007/s10845-014-1014-4](https://doi.org/10.1007/s10845-014-1014-4).
- Liao, T., Egbelu, P., Chang, P., 2013. Simultaneous dock assignment and sequencing of inbound trucks under a fixed outbound truck schedule in multi-door cross docking operations. *International Journal of Production Economics* 141, 212–229.
- Melián-Batista, B., Ángel Bello, F., Moreno Vega, J.M., 2024. New benchmark instances for the cross-dock door assignment and scheduling problem. doi:[10.17632/xv55vgdh79.1](https://doi.org/10.17632/xv55vgdh79.1).
- Rahmanzadeh Tootkaleh, S., Fatemi Ghomi, S., Sheikh Sajadieh, M., 2016. Cross dock scheduling with fixed outbound trucks departure times under substitution condition. *Computers and Industrial Engineering* 92, 50 – 56. doi:[10.1016/j.cie.2015.12.005](https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.005).
- Rijal, A., Bijvank, M., de Koster, R., 2019. Integrated scheduling and assignment of trucks at unit-load cross-dock terminals with mixed service mode dock doors. *European Journal of Operational Research* 278, 752–771. doi:[10.1016/j.ejor.2019.04.028](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.04.028).

Sayed, S., Contreras, I., Diaz, J., Luna, D., 2020. Integrated cross-dock door assignment and truck scheduling with handling times. TOP 28, 705–727. doi:10.1007/s11750-020-00556-z.

Theophilus, O., Dulebenets, M.A., Pasha, J., Abioye, O.F., Kavoori, M., 2019. Truck scheduling at cross-docking terminals: A follow-up state-of-the-art review. Sustainability (Switzerland) 11. doi:10.3390/su11195245.

Ye, Y., Li, J., Li, K., Fu, H., 2020. Truck scheduling optimization at a cold-chain cross-docking terminal with product perishability considerations. ScienceGate .

Zhang, T., Saharidis, G., Theofanis, S., Boile, M., 2010. Scheduling of inbound and outbound trucks at cross-docks: Modeling and analysis. Transportation Research Record , 9 – 16doi:10.3141/2162-02.