

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e ingenierías

**Optimización del funcionamiento de una bodega aeroportuaria:
uso de DMAIC como camino hacia un gemelo digital**

María Isabel Dávila Vásquez

Leonardo Saltos Garcés

Doménica Ordóñez Luzuriaga

Ingeniería Industrial

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero industrial

Quito, 28 de abril de 2025

Universidad San Francisco de Quito USFQ

Colegio de Ciencias e ingenierías

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Optimización del funcionamiento de una bodega aeroportuaria: uso de
DMAIC como camino hacia un gemelo digital**

María Isabel Dávila Vásquez

Leonardo Saltos Garcés

Doménica Ordóñez Luzuriaga

Nombre del profesor, Título académico

Sonia Valeria Avilés Sacoto, PhD

Carlos Alberto Suárez Núñez, PhD

Roberto Omar Andrade Paredes, PhD

Quito, 28 de abril de 2025

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos:	María Isabel Dávila Vásquez
Código:	00322012
Cédula de identidad:	1724079999
Lugar y fecha:	Quito, 28 de abril de 2025

Nombres y apellidos:	Leonardo Saltos Garcés
Código:	00325130
Cédula de identidad:	1721401956
Lugar y fecha:	Quito, 28 de abril de 2025

Nombres y apellidos:	Doménica Ordóñez Luzuriaga
Código:	00321669
Cédula de identidad:	1753384112
Lugar y fecha:	Quito, 28 de abril de 2025

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

RESUMEN

Este estudio optimiza las operaciones de Novacargo, empresa de carga aérea en el Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre de Quito, enfocándose en la gestión de carga sobredimensionada del muelle 19. Las empresas de logística enfrentan desafíos como el crecimiento de la demanda, sanciones por retrasos, alta utilización de recursos y variabilidad operativa. Novacargo, con aumentos de demanda del 8 % en 2023 y 5 % en 2024, experimentó cuellos de botella críticos en el Muelle 19, ocasionando retrasos y multas significativas. Para abordar estos problemas sin interrumpir las operaciones reales, se aplicó la metodología DMAIC junto con simulación de eventos discretos (DES), aprovechando su capacidad para analizar escenarios de mejora, anticipar fallos y optimizar procesos en un entorno controlado. Se utilizó FlexSim como herramienta de simulación, dada su precisión, flexibilidad para modelar operaciones logísticas complejas y su facilidad de integración con bases de datos en tiempo real. Los resultados mostraron una reducción del 15,4 % en los tiempos de espera, una disminución en la utilización crítica de operadores (de más del 85 % a niveles óptimos), y una validación del modelo con solo 0,82 % de desviación respecto al crecimiento real. Además, se implementó un gemelo digital conectado a una base de datos espejo en SQL Server, permitiendo la monitorización casi en tiempo real y la detección proactiva de desviaciones. Se concluye que la combinación de DMAIC, simulación y gemelos digitales constituye un enfoque robusto para la mejora continua, elevando la eficiencia operativa y reduciendo riesgos. A futuro, esta estrategia posiciona a Novacargo hacia la automatización avanzada y una logística predictiva bajo los principios de la Industria 4.0.

Palabras clave: Optimización logística, carga aérea, Simulación, Gemelo Digital, DMAIC, FlexSim, Industria 4.0, Paletización, Mejora continua, Carga sobredimensionada.

ABSTRACT

This study optimizes the operations of Novacargo, an air cargo company at the Mariscal Sucre International Airport in Quito, focusing on the management of oversized cargo at Dock 19. Logistics companies face challenges such as growing demand, penalties for delays, high resource utilization, and operational variability. Novacargo, with demand increases of 8% in 2023 and 5% in 2024, experienced critical bottlenecks at Dock 19, leading to significant delays and penalties. To address these issues without disrupting real operations, the DMAIC methodology was applied alongside Discrete Event Simulation (DES), leveraging its ability to analyze improvement scenarios, anticipate failures, and optimize processes in a controlled environment. FlexSim was used as the simulation tool, given its accuracy, flexibility for modeling complex logistics operations, and ease of integration with real-time databases. The results showed a 15.4% reduction in waiting times, a decrease in critical operator utilization (from over 85% to optimal levels), and model validation with only 0.82% deviation from actual growth. Additionally, a digital twin connected to a mirror database in SQL Server was implemented, enabling near real-time monitoring and proactive deviation detection. It is concluded that the combination of DMAIC, simulation, and digital twins constitutes a robust approach to continuous improvement, enhancing operational efficiency and reducing risks. Looking ahead, this strategy positions Novacargo towards advanced automation and predictive logistics under the principles of Industry 4.0.

Keywords: Logistics optimization; Air cargo; Simulation; Digital twin; DMAIC; FlexSim; Industry 4.0; Palletizing; Continuous improvement; Oversized cargo.

TABLA DE CONTENIDO

1.Introducción	10
2.Marco Teórico.....	14
2.1. Transporte de carga	14
2.2. La simulación como herramienta	16
2.3. Software de simulación	17
2.4. Software FlexSim.....	17
2.5. Uso de FlexSim en la Industria de cargo aérea	18
2.6. Evolución hacia gemelos digitales	20
2.7. Gemelos digitales en logística, carga y cadena de suministros	20
3. Metodología	22
4. Estudio de caso	25
5. Metodología DMAIC	25
5.1. Definir	25
5.2. Medir	29
5.3. Analizar	31
5.4. Mejorar	35
5.5. Controlar.....	42
6. Resultados.....	49
7. Discusión	50
8.Conclusiones	52
9. Referencias.....	53
10. Apéndices	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Metodología DMAIC aplicada a Industria 4.0	24
Tabla 2.- KPI's utilizados	28
Tabla 3.- Plan de recolección de datos	29
Tabla 4.- Resultados de la simulación.....	39
Tabla 5.- Diseño experimental	29
Tabla 6.- Interacción de las tablas de la base de datos	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Evolución de VOC a CTQ	26
Figura 2.- Gráficas de control IMR.....	30
Figura 3.- Distribución interarribo	32
Figura 4.- Demanda por hora del día	32
Figura 5.- Distribución tiempo de procesamiento.....	32
Figura 6.- Distribución tiempo de bodegaje	32
Figura 7.- Demanda semanal para carga sobredimensionada	32
Figura 8.- Comparativo del crecimiento semanal de demanda 2023 vs 2024	32
Figura 9.- Demanda semanal (seis primeras semanas) 2023 vs 2024 vs 2025	33
Figura 10.- Pronósticos de demanda 2025 utilizando Holt-Winters	34
Figura 11.- Comparativo de demandas semanales	34
Figura 12.- Modelo traducido	36
Figura 13.- Escáner sobredimensionado hecho en Fuxion	37
Figura 14.- Piso almacén hecho en Inventor.....	37
Figura 15.- Plano de instalaciones reales de Novacargo.....	38
Figura 16.- Distribución de número de Skids por ULD.....	39
Figura 17.- % de utilización con 3 operadores	40
Figura 18.- % de utilización con 4 operadores	40
Figura 19.- Orden de conexión directa entre la base de datos espejo a csv y FlexSim	46
Figura 20.- Orden de conexión directa entre la base de datos espejo y FlexSim	47
Figura 21.- Process Flow para el gemelo digital	48

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, existe la necesidad de que los sistemas y procesos de la cadena de suministro sean más eficientes, especialmente en un mundo globalizado, el cual requiere productos y servicios entregados en el momento y lugar adecuados, al tiempo que minimiza los costos a través de la operación. (Ruiz-López, 2024). Para cumplir con estos requisitos, las empresas están implementando nuevas estrategias y tecnologías para analizar y mejorar sus operaciones logísticas. Por ejemplo, modelos de programación lineal y planes de simulación. (SKYPALLET, s. f.). Una de las principales industrias relacionadas con este campo a nivel mundial es el transporte aéreo de mercancías, que muestra un crecimiento sustancial en los últimos años. De hecho, "se prevé que el dominio del transporte aéreo crezca a una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 5,92% entre 2024 y 2029 y alcance un tamaño de mercado de 201.570 millones de dólares para entonces" (StarUs Insights, 2025). Además, en 2025, se espera que los volúmenes de carga alcancen los 72,5 millones de toneladas, un aumento del 5,8% con respecto a 2024. (IATA, 2024). Este crecimiento proyectado trae consigo una serie de desafíos importantes para las empresas de logística y transporte. Uno de los principales problemas es la capacidad limitada de infraestructura, ya que muchos aeropuertos, puertos y redes de transporte terrestre no han sido ampliados o modernizados al mismo ritmo que el crecimiento de la demanda, lo que genera congestión, retrasos y costos adicionales (Rodríguez, 2020). A esto se suma la falta de mano de obra calificada, un desafío creciente que impacta la eficiencia operativa debido a la escasez de operadores de maquinaria, personal de almacén y conductores especializados (World Economic Forum, 2023). Por lo tanto, es relevante analizar los procesos logísticos; para la toma de decisiones gerenciales basada en datos y la generación de un ciclo de mejora continua. Hasta el 2023, "las estadísticas mensuales de carga de la IATA han mostrado a América Latina como la región con el mayor crecimiento en el tráfico de carga y el mercado de flores y frutas se ha mantenido fuerte" (Brett, 2023). Ecuador, a pesar de sus limitaciones económicas, no se ha quedado atrás en este proceso de

nuevas implementaciones tecnológicas. De hecho, el país ha logrado avances significativos en la mejora de su sector de carga aérea, impulsado por iniciativas estratégicas y desarrollos de infraestructura. (Quiport, 2024). Según los ejecutivos del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre de Quito de Ecuador, algunas empresas como Novacargo, Servipallet, Pertraly y Novasan han invertido en su expansión debido a la necesidad de mejora continua. (Brett, 2023). De acuerdo con Novacargo, han tenido un aumento en términos de ganancias del 13% en 2023 en comparación con 2022, un crecimiento del 8% en 2024 en comparación con 2023 y se espera que el año 2025 supere al 2024 en un 9%. Sin embargo, esto representa una inversión a gran escala en términos de logística y operación, donde hay varios factores a considerar al implementar y evaluar los beneficios a largo plazo. Además, un factor importante a considerar son las desafortunadas multas que la empresa tuvo que considerar en su flujo de caja. (Vásquez.R, Comunicación personal, 2024). Según la gerencia, en 2024 tuvieron que asumir una cantidad que habría representado un mes de salario para el equipo administrativo justamente debido a los altos valores que tuvieron que descontarse para justificar las multas asociadas a los retrasos que la empresa ha experimentado. Como se mencionó anteriormente, Novacargo es una empresa ecuatoriana que opera en el Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre de Quito como agente de carga para aerolíneas de carga. Al trabajar con quince de las principales aerolíneas de carga del país, enfrenta desafíos logísticos en sus operaciones debido a un aumento del 8% y el 5% en la demanda en los últimos dos años, respectivamente. Debido a la variedad de clientes con la que esta cuenta, el manejo de carga es muy variable. Es decir, Novacargo maneja tipos de carga estándar; principalmente rosas de exportación y carga sobredimensionada; carga que incluye valorados, restos humanos, frutas, pesca fresca y verduras. Esta última representa un significativo cuello de botella debido a la limitante de tener un único escáner con el que la empresa cuenta para este tipo de carga. Además, existen desafíos como el pago de cuantiosas multas por retrasos generados por la falta de coordinación y

preparación logística. También, estos inconvenientes afectan los estándares de calidad y servicio que la empresa mantiene al trabajar con aerolíneas internacionales, lo que pone en riesgo su prestigio actual. Ante esta situación, se decidió utilizar la simulación como primera herramienta de análisis y mejora, dado que permite representar con precisión las operaciones logísticas actuales, identificar cuellos de botella, evaluar escenarios alternativos sin interrumpir las operaciones reales, y prever el impacto de cambios en la demanda o en la coordinación de recursos. La simulación facilita así la toma de decisiones basadas en datos, permitiendo optimizar los procesos de despacho y minimizar riesgos operativos y financieros.

Es por esto, el objetivo principal de este proyecto es desarrollar una propuesta integral que permita mejorar el proceso de paletizado de carga sobredimensionada en Novacargo. Para ello, se emplearán herramientas de simulación y análisis logístico, con la finalidad de incrementar la eficiencia operativa, reducir los retrasos y minimizar las multas asociadas a fallas de coordinación.

Dentro de este marco, uno de los primeros pasos es evaluar de manera detallada los procesos operativos actuales, considerando tanto los tiempos empleados como los recursos utilizados en cada etapa del manejo de la carga sobredimensionada. Este análisis inicial permitirá identificar cuellos de botella, desperdicios de recursos y oportunidades de mejora específicas. A partir de esta evaluación, se busca desarrollar un modelo de simulación que represente de forma precisa las operaciones de la empresa, enfocándose en las actividades críticas relacionadas con el manejo de carga sobredimensionada. Esta simulación permitirá explorar diferentes escenarios operativos y evaluar su impacto en la eficiencia y el desempeño del sistema.

El siguiente paso será proponer mejoras al proceso de manejo de carga sobredimensionada, con el objetivo de optimizar la eficiencia de las operaciones actuales y sentar las bases para la

futura implementación de un gemelo digital, que permitirá una monitorización continua y análisis en tiempo real para anticipar fallas, identificar cuellos de botella y reducir ineficiencias.

Para ello, la metodología propuesta en este trabajo es la desarrollada por Ocampo (2012), conocida como DMAIC-Sim, que integra herramientas de simulación y principios de Lean Six Sigma bajo la estructura de DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar). Esta metodología proporciona una hoja de ruta clara para identificar, analizar y eliminar ineficiencias mediante la experimentación de diferentes escenarios, superando las limitaciones de costo y riesgo que tendría realizar cambios directamente sobre el sistema real. Debido a la importancia de la industria de carga aérea y su crecimiento constante, las técnicas de simulación tradicionales podrían no ser las más adecuadas para captar la complejidad y dinamismo de las operaciones actuales. Por este motivo, este trabajo se enfoca en el desarrollo de un enfoque basado en el gemelo digital, que no sería posible sin un análisis previo detallado que identifique las causas raíz de los problemas y estudie datos operativos brutos, permitiendo proponer soluciones fundamentadas sin interrumpir las operaciones reales.

En este contexto, se establecen los siguientes objetivos específicos: evaluar los procesos operativos actuales considerando tiempos y recursos utilizados en cada etapa; simular un modelo que represente fielmente las operaciones enfocadas en el manejo de carga sobredimensionada; y, finalmente, proponer mejoras que faciliten una futura implementación de un gemelo digital como herramienta de optimización continua.

En este trabajo, la primera sección incluye la investigación realizada sobre las herramientas y escenarios incluidos en este estudio, la sección 2 presenta la metodología utilizada, la sección 3 analiza los resultados obtenidos, la sección 4 presenta la discusión y finalmente, la sección 6 presenta las conclusiones alcanzadas.

2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se abordan temas fundamentales como la importancia del transporte de carga aérea, el uso de simulaciones para la optimización logística, las ventajas de herramientas como FlexSim, y la evolución hacia gemelos digitales, elementos que sustentan el análisis y la mejora de los procesos estudiados.

2.1. Transporte de carga aérea

En Ecuador, la exportación es una de las principales actividades económicas, representando el 26,2% del producto interno bruto total del país (EXPORTACIONES Ecuador 2023, 2023). A pesar de atravesar varias crisis, productos como las rosas y las flores de verano registraron un aumento del 4% en 2023, posicionando a Ecuador como el tercer proveedor mundial de flores. (ExpoFlores, 2018). Asimismo, las exportaciones de productos como el banano y otras frutas también registraron aumentos del 15% y el 29%, respectivamente. (ExpoFlores, 2018). Este factor ha incrementado la demanda de servicios de carga aérea, impulsando inversiones en infraestructura aeroportuaria y logística. Este crecimiento garantiza la estabilidad de las aerolíneas de carga, además que fomenta la optimización de costos mediante avances tecnológicos e intensifica la competencia. Adicionalmente, se plantea la necesidad de prácticas sostenibles, impulsando a la industria hacia soluciones más ecológicas. En general, la expansión de las exportaciones de Ecuador está impulsando la eficiencia, la innovación y el crecimiento a largo plazo en el sector de la carga aérea (ExpoFlores, 2018).

Si bien estos esfuerzos han avanzado, aún existe un problema con el embalaje y el transporte de mercancías, ya que este último sigue siendo uno de los eslabones más costosos de la cadena de suministro pues representa el 20% de los costos de esta (Yao et al., 2024). El uso eficiente de la logística de transporte mejora considerablemente la eficiencia operativa, la satisfacción del cliente y reduce costos (Ali et al., 2022). Dicho esto, es importante mencionar que el objetivo principal es identificar los procesos más rentables que garanticen el cumplimiento de los requisitos de envío y entrega de los clientes (Nahum et al., 2019). Por todo

esto, el transporte aéreo de mercancías ha demostrado ser un servicio eficaz que se basa en aviones de carga de alta capacidad para maximizar la rentabilidad y atender a las organizaciones que necesitan transporte especializado de mercancías sensibles a diferentes zonas, operando redes globales y conectando diversos destinos. (Kumar Kushwaha et al., 2024). A pesar de esto, esta industria enfrenta algunos desafíos. Por ejemplo, eventos sociales como pandemias, conflictos geopolíticos y desastres naturales pueden generar una gran variabilidad en la demanda, por lo que las empresas deben adaptar sus estrategias de cadena de suministro de inmediato para mantenerse competitivas. (Sancia, 2024). Además, “las barreras comerciales complican aún más la situación”. (World Trade Organization WTO, 2023). Los aranceles y las sanciones impuestas por los gobiernos y, por lo tanto, por las aerolíneas no solo retrasan los envíos, sino que también aumentan los costos para las empresas que dependen del transporte aéreo.” (Sancia, 2024). Además, según Novacargo, el problema de la paletización es uno de los mayores desafíos que enfrentan las empresas de carga aérea. Esto se debe a los diferentes tipos de productos que procesan. Esto incluye:

- Urgente: Artículos que requieren entrega rápida a largas distancias, como repuestos o animales vivos. (Group IFS,2025).
- Perecederos: Bienes que necesitan condiciones controladas para evitar su deterioro, como flores, productos farmacéuticos o alimentos frescos. (Group IFS,2025).
- Valiosos: Artículos de alto valor que requieren un manejo seguro, como semiconductores, joyas, dinero en efectivo u obras de arte. (Group IFS,2025).
- Peligroso: Materiales que requieren precauciones especiales para evitar daños al medio ambiente, como productos químicos, baterías o sustancias radiactivas. (Group IFS,2025)

Esta variedad de productos representa un problema a la hora de optimizar la carga de mercancías en los pallets de los aviones para maximizar la utilización del espacio, lo que provoca pérdida de dinero y recursos.

2.2. La simulación como herramienta

La complejidad inherente a los procesos de logística y paletización de carga aérea requiere la adopción de herramientas computacionales avanzadas capaces de analizar, optimizar y simular diversos escenarios sin interferir con las operaciones reales. (Banks, J., 2014). Esto, debido a la naturaleza altamente dinámica de la logística de carga aérea, caracterizada por la variedad de tipos de carga, estrictos requisitos regulatorios y limitaciones de espacio, requiere una planificación y optimización precisas para garantizar la eficiencia operativa. (Mesquita & Sanches, 2024) Las tecnologías de simulación facilitan la creación de entornos virtuales donde factores críticos como la asignación de carga, el balanceo de peso, el esfuerzo operativo y las limitaciones de espacio pueden evaluarse y abordarse meticulosamente (PierNext, 2023). Siempre habrá factores que requieran mejoras o que deban optimizarse. La motivación para evaluar estos eventos reside en la necesidad de evaluar modelos complejos de forma eficaz, especialmente con costos y presupuestos limitados. Afortunadamente, disponemos de herramientas que nos permiten evaluar este tipo de proceso y realizar una simulación, lo que en este contexto significa replicar o simular un sistema real mediante la experimentación con un modelo o una representación del mismo. (Banks, 2014) Sin embargo, también es importante considerar factores como la definición, el diseño y la construcción de una representación de los experimentos mediante la recopilación y el análisis de datos. (Beaverstock y Greenwood, 2017)

Debido a estos desafíos logísticos y a la creciente complejidad en la gestión de carga aérea, se vuelve indispensable el uso de herramientas avanzadas que permitan analizar, optimizar y mejorar los procesos de manera eficiente sin interrumpir las operaciones reales.

2.3. Software de simulación

Los métodos tradicionales basados en cálculos simples ya no son suficientes debido a la complejidad e imprevisibilidad de los sistemas modernos (Beaverstock y Greenwood, 2017). Por ello, ha surgido la necesidad de desarrollar sistemas de análisis para la toma de decisiones que sirvan como herramientas o "perspectivas" para ayudar a formular planes de acción. (Beaverstock y Greenwood, 2017). La simulación es una aplicación clave del soporte de decisiones, definida como la experimentación con un modelo informático simplificado de un sistema operativo a lo largo del tiempo para comprenderlo mejor o mejorarlo (Beaverstock y Greenwood, 2017).

A pesar de la variedad de software de análisis, FlexSim ha demostrado ser una de las mejores herramientas para este tipo de procesos, ya que es una herramienta analítica comúnmente utilizada para el diseño de procesos y la toma de decisiones. (Beaverstock y Greenwood, 2017). Ha mostrado ventajas en comparación con otros software, como su facilidad de uso, escalabilidad, versatilidad, interfaz intuitiva, modelado 3D y herramientas de análisis avanzadas (Greenwood, s.f.). Este software de simulación permite a los usuarios crear modelos tridimensionales que replican sistemas reales, como procesos de producción. (Lewicki et al., 2024). Esto es posible gracias a su capacidad para transformar datos en predicciones precisas y exactas como resultado (Lewicki et al., 2024).

2.4. Software FlexSim.

FlexSim como se mencionó anteriormente, es un programa informático que ayuda a crear modelos virtuales y, recientemente, ha generado aplicaciones de primer nivel en campos como la medicina, la atención médica y la logística, incluyendo operaciones de contenedores en puertos y simulaciones distribuidas que involucran a múltiples equipos dentro de empresas manufactureras. (Díaz-Martínez et al., 2018)

También se ha aplicado con éxito en industrias como la minería, la aeroespacial y los servicios (p. ej., hoteles, hospitales, supermercados), lo que permite la simulación de la gestión de recursos humanos y los procesos operativos. (Díaz-Martínez et al., 2018) El desarrollo del sistema en este software consta de cinco pasos básicos: desarrollar el diseño en 3D, conectar los objetos con sus respectivas relaciones, configurar los detalles, ejecutar el modelo y analizar los resultados. (Nordgren, sf) Con los resultados obtenidos por las diferentes ejecuciones realizadas por el sistema, el usuario puede comprender fácilmente gráficos y métricas que le permitirán tomar decisiones informadas y precisas sin necesidad de ensayos físicos. (Nordgren, sf)

2.5. Uso de FlexSim en las industrias de carga aérea

La implementación de FlexSim en la industria de carga aérea representa una solución

innovadora para gestionar las complejidades inherentes a este campo. (FlexSim, 2020) Unas operaciones de carga aérea eficaces requieren una planificación meticulosa para gestionar diversos tipos de carga, optimizar los procedimientos de paletización y cumplir con estrictas limitaciones regulatorias y de espacio. (Mesquita & Sanches, 2024) FlexSim proporciona a las partes interesadas un entorno seguro para evaluar y optimizar sus procesos. (FlexSim, 2020) Este enfoque no solo impulsa la eficiencia y reduce los gastos operativos, sino que también garantiza el cumplimiento de los protocolos de seguridad y los estándares de la industria. (Yung Po Tsang et al., 2024). A medida que el volumen y la complejidad de las operaciones de carga aérea siguen aumentando, FlexSim se destaca como un recurso poderoso para optimizar los flujos de trabajo logísticos e impulsar la innovación en todo el sector. De hecho, autores como Yung Po Tsang (2024) han realizado importantes experimentos sobre los procesos de carga y han concluido que es una forma eficiente de evaluar diferentes escenarios y analizar los resultados con indicadores clave, lo que facilita la toma de decisiones informadas y conscientes. Además, reduce los riesgos operativos al

anticipar posibles cuellos de botella y puntos débiles en la red de carga aérea (Yung Po Tsang et al., 2024).

El sector del transporte aéreo de mercancías se ha beneficiado enormemente del uso de herramientas de simulación como FlexSim. (FlexSim, 2020). Para ayudar a las partes interesadas a detectar ineficiencias y aumentar el rendimiento sin interferir con los flujos de trabajo reales, FlexSim se ha utilizado ampliamente para modelar y analizar procesos en terminales de carga, incluyendo el almacenamiento, la manipulación de carga y las operaciones terrestres (FlexSim, 2020). Los operadores de carga aérea han podido evaluar diferentes escenarios, asignar recursos de forma eficiente y mejorar los niveles de servicio gracias a estos modelos de simulación de eventos discretos. (FlexSim, 2020). Sin embargo, la industria se está alejando de las herramientas de simulación tradicionales y optando por el uso de gemelos digitales, debido al aumento en la complejidad logística y la creciente disponibilidad de datos en tiempo real a través de tecnologías como “Internet of things” (IoT) y sensores inteligentes. A diferencia de los modelos tradicionales, los gemelos digitales permiten realizar simulaciones dinámicas en tiempo real, anticipar fallos y optimizar decisiones de manera continua (Tao et al., 2018; Glaessgen & Stargel, 2012).

Los gemelos digitales permiten realizar pruebas de escenarios más precisas y rápidas, realizar mantenimiento predictivo de equipos y supervisar continuamente el flujo de carga en el transporte aéreo de mercancías (Erguido et al., 2023). Un avance importante en la consecución de la excelencia operativa y la resiliencia en la cadena de suministro de carga aérea reside en la transición de herramientas basadas en simulación como FlexSim a sistemas de gemelos digitales totalmente integrados (Glaessgen y Stargel, 2012).

2.6. Evolución hacia los gemelos digitales

Los Gemelos digitales constituyen una copia virtual de algo real, como una máquina, un edificio o incluso una ciudad entera, que se comporta exactamente igual que la versión real. (Glaessgen & Stargel, 2012). Esto es posible gracias a la recopilación de datos en tiempo real mediante sensores, sistemas “Enterprise Resource Planning” (ERPS) o datos históricos. (Tao et al., 2018). Con esto, las personas pueden evaluar objetos, predecir problemas y mejorar el rendimiento sin tocar el objeto real. (Attaran & Celik, 2023). Afortunadamente, debido al continuo crecimiento de la Industria 4.0, esta representación puede incluso incluir una cadena de suministro completa de servicios o de fabricación (Mohamed et al., 2024)

Hoy en día, la transformación digital del sector del transporte y la logística exige un enfoque multifacético, considerando los múltiples factores del entorno y su impacto económico y ecológico (Cuñat Negueroles et al., 2024). Las tecnologías de gemelos digitales prometen ser una parte importante de los sistemas de información de las empresas industriales en la próxima década (Cuñat Negueroles et al., 2024). De hecho, en 2019, el mercado de gemelos digitales se estimó en casi 4 mil millones de dólares y se estima que alcanzará los 35 mil millones de dólares para 2025, con un crecimiento anual superior al 38%. (MarketsandMarkets, 2020). De esta cantidad, aproximadamente el 20% se destinará a la digitalización de la cadena de suministro (Cuñat Negueroles et al., 2024). Esto se debe a los beneficios de reducción de costos y aumento de la eficiencia que ofrecen las soluciones de gemelos digitales. (Attaran & Celik, 2023)

2.7. Gemelos digitales en logística, carga y cadena de suministro

Al crear equivalentes virtuales complejos que imitan activos y actividades del mundo real, los gemelos digitales están revolucionando la logística y el transporte. (Vashishth et al., 2024) Desde plantas de fabricación hasta centros de distribución y redes de transporte, estos modelos digitales ofrecen una representación interconectada y en constante actualización de los

elementos de la cadena de suministro. (Vashishth et al., 2024) Su capacidad para proporcionar información operativa integral es una ventaja significativa, ya que permite a las partes interesadas rastrear el estado de los activos, evaluar las variaciones de inventario e identificar ineficiencias. (Vashishth et al., 2024) Esta comprensión exhaustiva facilita la toma de decisiones basadas en datos, lo que ayuda a las empresas a optimizar los procesos logísticos y a prevenir posibles problemas antes de que se descontrolen. (Vashishth et al., 2024). La inteligencia predictiva de los gemelos digitales es una de sus características más revolucionarias. (Vashishth et al., 2024). Estos sistemas pueden prever riesgos e ineficiencias combinando tendencias históricas con información en tiempo real, lo que permite a los operadores logísticos tomar medidas proactivas para resolver problemas. (Vashishth et al., 2024). Por ejemplo, pueden predecir ralentizaciones en la cadena de suministro, optimizar las rutas de transporte para evitar el tráfico o las inclemencias del tiempo, y predecir cuándo la maquinaria o los vehículos necesitan mantenimiento. (Vashishth et al., 2024). Las empresas pueden reducir gastos, mejorar la fiabilidad y minimizar las interrupciones operativas al pasar de la resolución reactiva de problemas a la optimización proactiva. (Vashishth y otros, 2024).

Los gemelos digitales permiten mejorar las redes de transporte, además del análisis predictivo. (Vashishth y otros, 2024). Las empresas de logística pueden simular diferentes escenarios de rutas y estrategias de distribución de recursos mediante la creación de simuladores de flotas virtuales, que incluyen camiones, barcos y aviones. (Vashishth y otros, 2024). Mediante la identificación de rutas de transporte más respetuosas con el medio ambiente, estas simulaciones ayudan a reducir las ineficiencias, optimizar el consumo de combustible y minimizar su impacto en el medio ambiente. (Vashishth y otros, 2024). También permiten a las empresas adaptarse con mayor rapidez a las condiciones cambiantes del mercado, la legislación y las fluctuaciones de la demanda. Los gemelos digitales se utilizan en la gestión de activos para supervisar el rendimiento y el estado de la infraestructura logística

mediante sistemas de monitorización basados en sensores. (Vashishth y otros, 2024). Estos sistemas pueden identificar irregularidades y anticipar fallos mecánicos antes de que ocurran mediante la recopilación continua de datos operativos de automóviles, instalaciones de almacenamiento y redes de transporte. (Vashishth y otros, 2024). Al evitar averías costosas y prolongar la vida útil de los activos, este enfoque de mantenimiento proactivo garantiza la continuidad de las operaciones logísticas. (Vashishth et al., 2024).

En resumen, al mejorar la visibilidad, permitir la previsión predictiva, optimizar las tácticas de transporte, perfeccionar la gestión de activos y promover ecosistemas colaborativos, los gemelos digitales están revolucionando el funcionamiento de los sistemas logísticos y de transporte. (Vashishth y otros, 2024). Estos modelos digitales serán aún más cruciales a medida que la tecnología avance, ayudando a las empresas a crear marcos logísticos robustos, económicos y ecológicos que les permitan gestionar las complejidades de las cadenas de suministro contemporáneas con inteligencia y agilidad. (Vashishth et al., 2024).

Una vez comprendidos los términos importantes y consideradas y reconocidas las investigaciones de la industria y las herramientas a utilizar, se explica la metodología aplicada para lograr los objetivos.

3. METODOLOGÍA

La implementación de diferentes técnicas y software para la resolución de problemas ha evolucionado gracias al desarrollo de la Industria 4.0. (Ibrahim & Kumar, 2025). La Cuarta Revolución Industrial trajo consigo una serie de innovaciones tecnológicas que revolucionaron el sector industrial. (Ibrahim & Kumar, 2025). Tecnologías modernas como la inteligencia artificial (IA), el aprendizaje automático (ML), (IoT), los sensores inteligentes, los sistemas ciberfísicos y el análisis de big data se incorporan a esta revolución para construir sistemas inteligentes e interconectados. (Ibrahim & Kumar, 2025). Los fabricantes pueden recopilar datos en tiempo real mediante el IoT y sensores inteligentes, lo que permite que los algoritmos

de aprendizaje automático proporcionen información predictiva. (Ibrahim & Kumar, 2025). Sin embargo, esto también implica una metodología que pueda seguir el ritmo de esta evolución y el cambio constante de los procesos involucrados en la industria del transporte aéreo. (Ibrahim & Kumar, 2025). Lean Six Sigma es una metodología popular de mejora de procesos que reduce los fallos y minimiza la variabilidad. Incluso según algunos autores, Lean Six Sigma "es la más eficaz en la mejora de procesos y está ampliamente implementada en las organizaciones de alto rendimiento". (Ibrahim & Kumar, 2025). Esta metodología garantiza una producción consistente y de alta calidad mediante la identificación y reducción de la variabilidad mediante herramientas estadísticas. Lean Six Sigma ofrece metodologías estructuradas, como DMAIC (definir, medir, analizar, mejorar y controlar), para optimizar procesos y reducir defectos. Con esto, las simulaciones de gemelos digitales, combinadas con la fase de mejora de DMAIC, permiten la prueba virtual de los cambios propuestos, garantizando resultados sostenibles con riesgos mínimos. (Ibrahim & Kumar, 2025)

Al fusionar tecnologías de vanguardia en tiempo real con la estructura de los enfoques de resolución de problemas, Lean Six Sigma e Industria 4.0 pueden combinarse para crear un marco integrado que combina las mejores características de ambos paradigmas. (Ibrahim & Kumar, 2025). Mientras que la Industria 4.0 ofrece tecnologías basadas en datos en tiempo real, como aprendizaje automático, IoT y análisis de big data, que mejoran la precisión, la velocidad y la escalabilidad de las iniciativas de mejora, Lean Six Sigma proporciona sólidas herramientas estadísticas para la mejora continua de procesos mediante metodologías DMAIC. (Ibrahim & Kumar, 2025). Según Ibrahim y Kumar (2025), esta integración acelera la mejora de procesos y los resultados de sostenibilidad. Las etapas de esta metodología son Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar. La fase de Definir consiste en identificar el problema y sus características mediante herramientas de captura de datos como sensores IoT y big data, que permiten un mejor entendimiento del contexto en tiempo real. La fase de Medir tiene como

objetivo la recolección automatizada de datos del proceso, utilizando tecnologías inteligentes que aseguren la calidad y cantidad adecuada de información para su posterior análisis. La fase de Analizar emplea técnicas de analítica avanzada, control estadístico y simulación de procesos (como modelos de eventos discretos o gemelos digitales) para procesar los datos de forma integral y encontrar causas raíz. A continuación, la fase de Mejorar busca identificar e implementar soluciones basadas en el análisis previo, utilizando herramientas de simulación para validar mejoras antes de su aplicación en el entorno real. Finalmente, la fase de Controlar utiliza sistemas de monitoreo en tiempo real y dashboards inteligentes para comparar el desempeño del proceso antes y después de las mejoras implementadas, comprobando así su impacto en la resolución de los problemas identificados. (VIVA-Tech, 2023; Sustainability, 2024). Esto se muestra con más claridad en el gráfico a continuación:

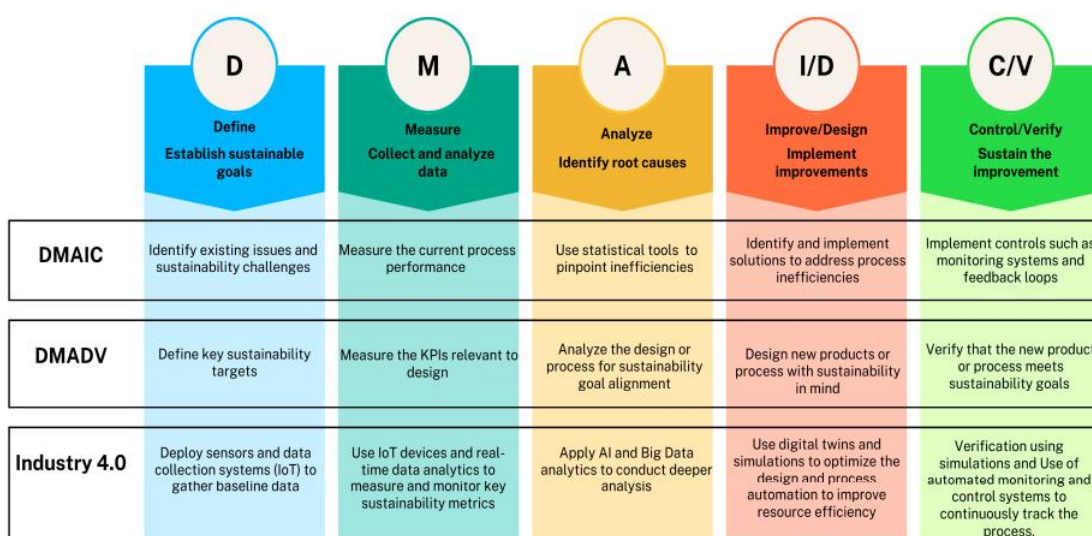


Tabla 1.- Metodología DMAIC aplicada a Industria 4.0

(Ibrahim & Kumar, 2025)

Esto se complementa con la construcción de una simulación de eventos discretos (DES) siguiendo a Banks implica 12 pasos básicos: primero, formular claramente el problema a resolver y definir los objetivos del estudio. Luego, desarrollar un modelo conceptual que

represente el sistema real de manera simplificada pero precisa. Después, recopilar los datos necesarios para alimentar el modelo, asegurando su calidad y relevancia. Se debe traducir el modelo conceptual en un modelo computacional, eligiendo el software de simulación adecuado. A continuación, verificar que el modelo computacional funcione como fue planeado y validarlo, es decir, comprobar que sus resultados reflejan razonablemente el comportamiento del sistema real. Posteriormente, diseñar los experimentos de simulación, determinando escenarios, parámetros y número de réplicas a ejecutar. Se ejecutan las simulaciones, se recopilan los datos de salida y se analizan estadísticamente los resultados para obtener conclusiones sólidas. Finalmente, se documentan los hallazgos y se presentan las recomendaciones basadas en el análisis. Todo el proceso debe estar acompañado de un plan de implementación si se pretende aplicar los cambios sugeridos en el sistema real. (Banks, 2014).

4. ESTUDIO DE CASO

Novacargo S.A.S. es una empresa ecuatoriana fundada el 4 de julio de 2005, especializada en servicios logísticos integrales, con un enfoque particular en la manipulación segura de carga perecible, como flores de exportación. Ubicada en el Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre de Quito, la compañía ofrece servicios auxiliares de paletización y consolidación de carga, garantizando el cumplimiento de la cadena de frío y estándares internacionales de calidad. Su compromiso con la eficiencia y la seguridad en el manejo de mercancías la ha posicionado como un actor clave en el sector logístico ecuatoriano, especialmente en el ámbito de las exportaciones florícolas. Dicho esto, la primera instancia a completar son los pasos del DMAIC.

5. METODOLOGÍA DMAIC

5.1. Definir

Definir el problema con precisión, identificar los indicadores clave de rendimiento (KPI) y definir los objetivos del proyecto de acuerdo con los requisitos del negocio son los principales objetivos de la fase de definir, que constituye la primera etapa del proceso DMAIC. Antes de

realizar cambios, es crucial comprender el estado actual del sistema y las ineficiencias durante esta fase. (Sokovic et al., 2010). Esta etapa se fortalece al combinarse con la Simulación de Eventos Discretos (DES), que aumenta la precisión en la detección de problemas al proporcionar una representación visual y basada en datos del proceso actual. (Banks, 2014). DES proporciona una base sólida para el análisis adicional en las siguientes fases de DMAIC, modelando el sistema actual y ayudando a cuantificar los cuellos de botella, las ineficiencias y el uso de recursos. (Kelton et al., 2015).

Para ello, el primer paso es analizar la opinión del cliente. En este caso, la del gerente y el equipo de Novacargo. La evolución desde la opinión del cliente hasta el requisito crítico de calidad descrito en la Ilustración 1 se define en el Apéndice 1.



Figura 1 Evolución de VOC a CTQ

Además, como se muestra en el **Apéndice 1**, la empresa muestra una serie de problemas con posibles soluciones a evaluar. Sin embargo, para definir el alcance de este estudio, se analizó y se discutió con las autoridades el impacto de este conjunto de problemas. El principal problema se encontró en el Muelle 19, dedicado a la carga sobredimensionada. Considerando que el 87% de la mercancía procesada son cajas de flores, este porcentaje de productos tiene el resto de los muelles disponibles para su procesamiento, es decir, 7 muelles. Para el 11% correspondiente a frutas, pescado, espárragos y otros productos de gran tamaño, el único muelle disponible es el Muelle 19.

La definición del problema establecido se muestra en el **Apéndice 2**. La principal motivación para la selección del problema es la cantidad de retrasos en el último año. Los

registros evidencian alrededor del 1% o 2% de retrasos del número total de guías procesadas dentro del muelle de carga sobredimensionada. Si bien este porcentaje no parece representativo, el 0,5% de esto genera grandes pérdidas económicas debido a las multas que cobran las aerolíneas consecuentes de los retrasos que se generan en sus operaciones debido al aplazamiento en el envío de carga. Considerando lo anterior, el objetivo es reducir los retrasos en un 10%, lo que impactará positivamente en los costos de la empresa y mantendrá su prestigio. Una vez seleccionado el problema a tratar, se realizó un análisis del proceso para identificar las causas raíz, los cuellos de botella y las ineficiencias que se presentan actualmente. El proceso AS-IS se ilustra en el *Apéndice 3*, una herramienta que permite representar visualmente el estado actual de un sistema con el objetivo de identificar ineficiencias, cuellos de botella y oportunidades de mejora antes de implementar cambios. Su principal ventaja es que proporciona una comprensión clara y compartida del proceso real, lo que facilita el análisis y la toma de decisiones basada en evidencia para la optimización. Además, se estableció el SIPOC; una herramienta que identifica las partes del proceso de paletizaje que se incluirá en el análisis. En el *Apéndice 4*, el SIPOC incluye entradas procesos y salidas dentro del proceso de carga sobredimensionada para tener un mejor entendimiento del proceso en diferentes etapas.

Finalmente, una vez definido el problema, se establecieron una serie de indicadores clave de rendimiento (KPI) para evaluar el proceso tal como está y el proceso ideal (TO BE). Esto permitió poner a prueba la simulación y obtener información valiosa para la posterior toma de decisiones sobre el comportamiento de los ejecutivos de Novacargo. Estos KPI se muestran en la *Tabla 2*.

Tabla IKPI's utilizados

KPI	Definición	Unidad de medida	Importancia
<i>Rendimiento</i>	<i>Cantidad de un producto o servicio que una empresa puede producir y entregar a un cliente en un periodo específico.</i>	<i>Unidades por tiempo (por ejemplo, pallets/hora, productos/día)</i>	<i>Determina la tasa de salida del sistema. Una mayor eficiencia se correlaciona con un mayor rendimiento.</i>
<i>Utilización del escáner</i>	<i>Métrica que mide la proporción de tiempo que el escáner del muelle 19 está siendo utilizado activamente en relación con el tiempo total disponible.</i>	<i>Porcentaje (%)</i>	<i>Demuestra la eficacia del uso de escáneres o equipos comparables. Mejora las estaciones de escaneo.</i>
<i>Utilización del operador</i>	<i>Métrica que mide la proporción de tiempo que los operadores que trabajan desde el muelle 19 están siendo utilizados activamente en relación con el tiempo total disponible.</i>	<i>Porcentaje (%)</i>	<i>Demuestra la eficacia del operador durante la tarea.</i>
<i>Tiempo de ciclo</i>	<i>El tiempo de ciclo es el tiempo total que tarda una unidad en moverse a través de un proceso desde el principio hasta el final.</i>	<i>Tiempo (por ejemplo, segundos, minutos, horas)</i>	<i>Muestra el tiempo que tarda una unidad en completar el proceso. La eficiencia aumenta con ciclos más cortos.</i>
<i>Tiempo de permanencia en el almacenamiento</i>	<i>El tiempo de permanencia se refiere al tiempo total que una entidad pasa dentro de una parte específica del sistema antes de pasar a la siguiente etapa o salir.</i>	<i>Tiempo (por ejemplo, segundos, minutos, horas)</i>	<i>Determina el tiempo que una unidad permanece en un lugar determinado. Ayuda a localizar cuellos de botella y retrasos en las regiones de procesamiento o preparación.</i>

(Mora García Luis Aníbal, 2015)

5.2. Medir

Una vez definido el problema, es necesario recopilar datos precisos y fiables para evaluar y optimizar el proceso de paletizaje de carga sobredimensionada. La fase de medir de la metodología DMAIC garantiza el uso de métricas importantes para cuantificar el rendimiento del proceso, lo que servirá de punto de partida para análisis adicionales.

Tabla 2 Plan de recolección de datos

Definición	Plan de recolección de datos para los principales procesos que involucran carga sobredimensionada
Objetivos	Recopilar datos para cuantificar el rendimiento de la paletización. Garantizar una entrada fiable para la Simulación de Eventos Discretos (DES).
Proceso estudiado	Paletización de carga sobredimensionada (Muelle #19 de Novacargo)
Fuente de datos	Operaciones de Novacargo
Método de recopilación de datos	Estudios de tiempos con cronómetro (seguimiento manual). Cronómetro móvil. Validación del sistema SIP25.
Alcance	Carga Sobredimensionada: Recepción, Descarga y Escaneo
Unidades de medida	Minutos
Plan de muestreo	Conveniencia dictada por los horarios permitidos de visitas y disponibilidad horaria de los estudiantes
Responsables	Estudiantes de tesis de Ingeniería Industrial
Frecuencia	Cada nueva recepción
Tiempo	2 días

Una vez ejecutado el plan, se recolectaron datos desde el 4 de marzo de 2025 hasta el 5 de marzo de 2025. Para el primer caso, los datos se recopilaron a partir de las 19:25. Los registros indican una mayor frecuencia de llegadas durante la tarde. Al día siguiente, la recopilación de datos se realizó a partir de las 18:00. Se tomaron 15 datos: 6 el primer día, finalizando la medición a las 22:13, y 9 al día siguiente, finalizando la medición a las 22:31.

Los datos tomados corresponden al tiempo que transcurre entre la recepción de pallets a través de la paletización en dispositivos de carga unitaria (ULD). Teniendo en cuenta que los ULD se cargan con SKID, una plataforma portátil como el pallet regular pero más pequeña. Con base en la naturaleza de la recolección de datos, se decidió utilizar un gráfico de control IMR. Dado que este gráfico de control está indicado para mediciones que se toman de forma aislada, y no es posible o práctico formar subgrupos racionales o incluso cuando una medición larga es costosa en cualquier sentido. Esta implementación se consideró necesaria para determinar si los procesos involucrados estaban bajo control o si el proceso era estable. También fue esencial validar los datos que se utilizarían para la simulación. Dado que la simulación con datos históricos es el primer paso, es esencial validar los datos de entrada, y también es importante que se realice el estudio con respecto a la variabilidad de los datos en todos estos procesos.

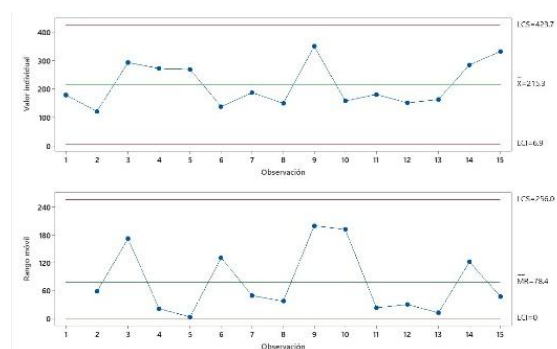


Figura 2.- Gráfico de control de IMR

Como se muestra en el gráfico anterior, las 15 observaciones están bajo control. Esto significa que los tiempos transcurridos entre los diferentes procesos varían, pero debido a causas comunes que siempre afectan a cierto nivel de variabilidad. Sin embargo, no hay indicios de factores anómalos en el proceso que puedan causar problemas significativos.

5.3. Analizar

Encontrar las causas subyacentes de las ineficiencias en el proceso de paletización de mercancías sobredimensionadas es el objetivo de la fase de Analizar de la metodología DMAIC. (Sokovic et al., 2010). Esta etapa se centra en examinar los cuellos de botella, las fuentes de variabilidad y las restricciones del sistema que podrían afectar la eficiencia operativa tras la validación de la estabilidad de los indicadores clave del proceso en la fase de medir. (Montgomery, 2019). El primer paso para considerar es un análisis de causa raíz. El diagrama de Ishikawa, a menudo conocido como diagrama de espina de pescado o diagrama de causa y efecto, es una herramienta sistemática que se utiliza para identificar y analizar las causas raíz de un problema. (Sharma & Rao, 2021) En este caso, se aplica al proceso de paletización de carga sobredimensionada en un almacén aeroportuario, donde los retrasos que resultan en sanciones se han señalado como un problema clave. Para ello, el **Apéndice 5** presenta las posibles causas del problema.

Una vez extraídos los datos, se analizaron para obtener las distribuciones y otros análisis relevantes para la simulación. Este análisis se realizó con Python para el análisis de datos, utilizando bibliotecas como Pandas, Numpy, Matplotlib y Scipy.stats.

Para comenzar, se analiza el tiempo entre llegadas (en segundos). Si bien se ajusta a una distribución lognormal, se estima que, en promedio, los camiones de proveedores llegan alrededor de 4 camiones por la mañana y por la noche cada 35 minutos. Esto se puede justificar analizando los datos registrados a diferentes horas del día. Como se muestra a continuación,

los principales picos de demanda se encuentran en las primeras horas de la mañana, el mediodía y la tarde.

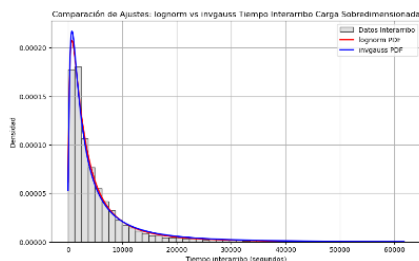


Figura 3.- Distribución interarribo

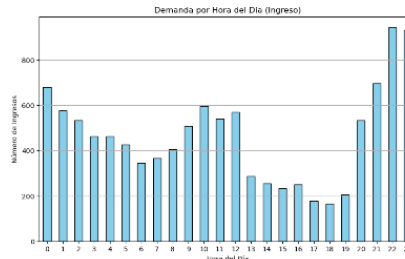


Figura 3.- Demanda por horas del día

Para la siguiente fase del proceso, los camiones permanecen en un muelle durante aproximadamente 50 minutos, con una distribución gaussiana inversa. Esto implica la recepción, descarga, escaneo y ensamblaje de ULD. Finalmente, para el almacenamiento, se puede concluir que la distribución corresponde a una distribución lognormal. El tiempo de almacenamiento estimado es de 16 horas.

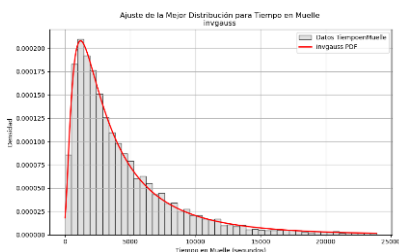


Figura 4.- Distribución tiempo de procesamiento

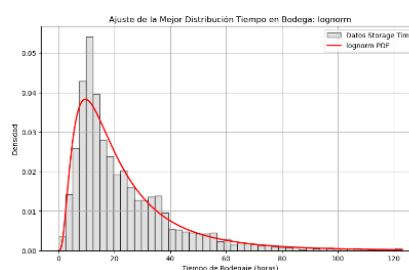


Figura 5.- Distribución tiempo de bodegaje

Luego, para una mayor comprensión del contexto de la demanda de la empresa se analizaron las tendencias y operaciones.

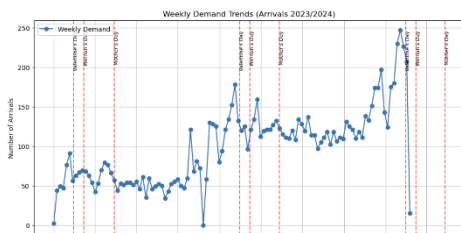


Figura 7.- Demanda semanal para carga sobredimensionada

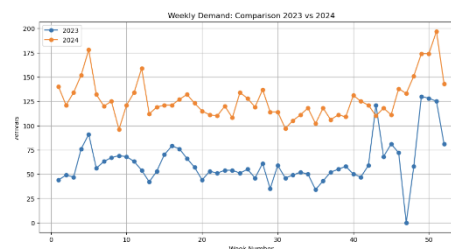


Figura 8.- Comparativa del crecimiento semanal de demanda 2023 vs 2024

Como se muestra en la Figura 7, existe una notable tendencia alcista con picos en ciertas fechas que incrementan principalmente la demanda de flores a nivel mundial. Esto provoca que las semanas previas a fechas importantes como San Valentín, el Día de la Mujer y el Día de la Madre Ruso presenten un aumento de la demanda, lo que genera ineficiencias operativas debido a la sobrecarga en los tiempos de los procesos operativos y el espacio de almacenamiento. En consecuencia, Novacargo enfrenta desafíos para garantizar la calidad de la paletización y evitar retrasos en las semanas de alta demanda. Además, Novacargo ha experimentado un crecimiento constante de la demanda, como se analiza en el marco teórico, con el crecimiento de la logística de carga a nivel mundial. Como se muestra en la Figura 8, 2024 tuvo una tasa de crecimiento constante en comparación con 2023.

Además, se realizó un análisis similar para las primeras seis semanas de 2023, 2024 y 2025 para comparar las primeras semanas de 2025 con años anteriores y analizar el crecimiento esperado para 2025. En este análisis se consideraron los datos hasta el 17 de febrero. Además de la primera semana de 2025, la tendencia muestra un aumento de la demanda para 2025.

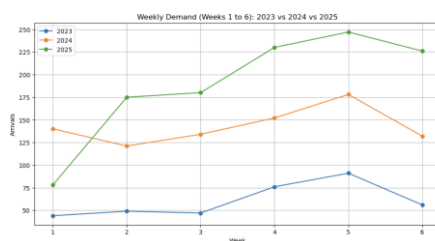


Figura 9.- Demanda semanal (seis primeras semanas) 2023 vs 2024 vs 2025

Tras confirmar el crecimiento esperado de la demanda en 2025, es crucial pronosticar el resto de la demanda de 2025 para considerar este crecimiento en la simulación y comparar los resultados de la simulación con el pronóstico desarrollado. Para este propósito, se evaluaron tres modelos: Holt's Linear, Holt's Damped y Holt-Winters Seasonal. Los tres modelos se compararon utilizando el Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE), que permite medir la

precisión de un modelo de pronóstico. (Nahmias, S., 2014). Los resultados mostraron que el mejor modelo con un MAPE del 9,35% es el Pronóstico de Tendencia Estacional de Holt-Winters. La Figura 10 muestra la demanda semanal esperada para 2025 pronosticada, y la Figura 10 muestra la comparación entre el pronóstico y la demanda de años anteriores.

Además, se evaluaron las condiciones necesarias para la robustez del modelo Holt-Winters. En concreto, se conoce la frecuencia estacional analizada previamente. La longitud de la serie debe incluir al menos dos ciclos completos y evitar valores atípicos extremos, lo que previene la explosividad de la tendencia y mantiene una baja heterocedasticidad. (Nahmias, S. 2014).

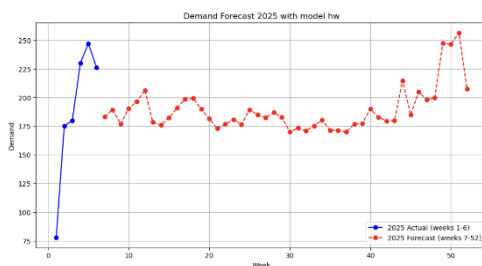


Figura 10.-Pronóstico de demanda 2025 utilizando Holt-Winters

Como resultado de este análisis, se comprende mejor los factores que afectan la eficiencia de la empresa y los desafíos que enfrenta derivados de la variabilidad de la demanda y el crecimiento constante que ha experimentado la industria de la aviación en los últimos años. Esto permite comprender mejor las dificultades para desarrollar soluciones adaptadas a las necesidades de la empresa.

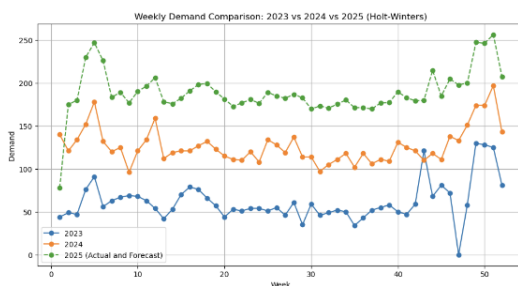


Figura 11.- Comparativo de demandas semanales

5.4. Mejorar

La Simulación de Eventos Discretos (DES) es una potente herramienta para la optimización de procesos. Esta técnica de modelado se utiliza para representar sistemas donde se producen cambios en diferentes momentos debido a eventos específicos. (Banks, 2014). DES permite probar diversos escenarios de mejora, detectar cuellos de botella y optimizar el consumo de recursos sin interferir con los flujos de trabajo reales, generando una versión virtual de las operaciones reales. (Kelton et al., 2015). Las organizaciones pueden experimentar con diversas tácticas, evaluar su eficacia y aplicar con confianza las soluciones más efectivas gracias a este enfoque basado en datos. (Tako & Robinson, 2020). En definitiva, la simulación ofrece un entorno sin riesgos para la mejora de procesos antes de implementar modificaciones reales, garantizando mejoras cuantificables en la eficacia y el rendimiento. Sin embargo, existe una guía estructurada paso a paso para crear un estudio de simulación. Esta se muestra en el **Apéndice 6** y se muestra la ejecución de estos doce pasos a continuación.

Formulación del problema

Como se mencionó en la fase Definir, el problema establecido a resolver corresponde a la reducción del 0,5% de los retrasos que implican multas monetarias (costos extra) para la empresa.

Conceptualización del modelo

Su objetivo principal es abstraer las características esenciales de un sistema real y transformarlas en un modelo simplificado que represente su comportamiento de forma útil, permitiendo así el desarrollo de modelos eficientes que capturen fielmente el sistema sin añadir detalles innecesarios, lo que facilita el análisis, la toma de decisiones y la optimización del sistema simulado.

En base a esto se definió el alcance, que en este caso de estudio estaría representado por el Muelle 19, sin embargo, se decidió incluir el resto de muelles de carga estándar para evaluar la funcionalidad de la bodega.

Recopilación de datos

Una vez definido el alcance, los 12 pasos de la simulación fueron puestos en práctica. Sin embargo, gracias a la integración con la herramienta DMAIC, la recopilación de datos ya se había realizado previamente. Se consideraron datos históricos del 1 de enero de 2023 al 31 de diciembre de 2024 para determinar las distribuciones correspondientes a los procesos involucrados, junto con sus parámetros. Además, se recopilaron datos durante dos días de operación para validar y respaldar los datos históricos utilizados. Todo esto se muestra previamente en la fase de Análisis.

Traducción de modelos

Al ofrecer métodos versátiles y potentes para la representación de sistemas, la traducción de modelos busca transformar la ideación en una representación computacional que el software de simulación pueda manejar, reduciendo considerablemente el tiempo de desarrollo. Sin embargo, el grado de flexibilidad necesario y el tipo de problema a resolver determinarán la selección del software. En este caso, se seleccionó FlexSim. El modelo traducido computacionalmente se muestra a continuación:

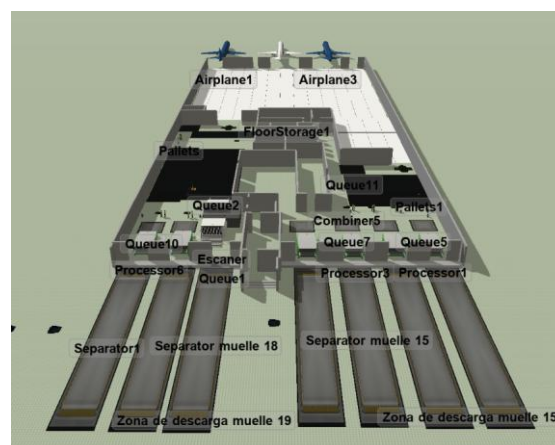
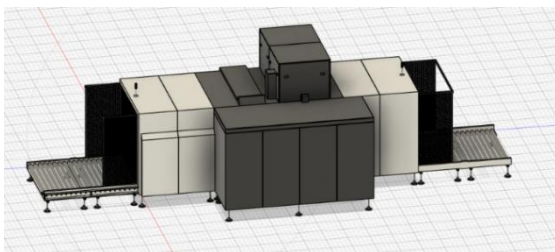
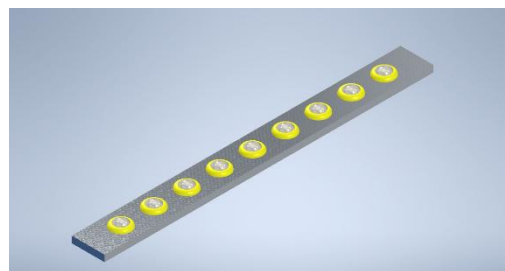


Figura 12.- Modelo traducido

El modelo simula el almacén del aeropuerto Novacargo. Muestra dos tipos de carga: uno con camiones con cajas individuales de flores y otro con palés con carga sobredimensionada. Para ello, se grafica la llegada de los camiones a los siete muelles de recepción, donde solo el Muelle 19 gestiona la carga sobredimensionada. En este paso, fue fundamental replicar el escáner de carga sobredimensionada para que el modelo se transcriba con precisión, así como el suelo característico, el cual cuenta con rodamientos para el traslado de carga con facilidad, siendo esta una gran incorporación a la empresa, ya que reduce el esfuerzo físico, agiliza el flujo de materiales, minimiza el desgaste de los equipos y aumenta la seguridad. Además, optimiza el espacio y facilita la manipulación de pallets pesados, mejorando así el rendimiento del sistema. Ambas representaciones se crearon con los softwares Vision y Fuxion. Una vez escaneada la mercancía, las cajas o palés recibidos se paletizan en ULD para su posterior aseguramiento y transporte en la cámara frigorífica. La carga espera en la cámara frigorífica hasta que el vuelo inicia el embarque y la aerolínea solicita la entrega de la carga según las guías de carga aérea. Hay tres puertas que conectan el espacio de almacenamiento con la pista, donde se entrega la carga a la agencia de seguridad de la aerolínea para su transporte hasta el avión.



*Figura 13.- Escáner sobredimensionado
hecho en Fuxion.*



*Figura 14.- Piso de almacén hecho en
Inventor.*

Verificación

El objetivo de la etapa de verificación de la simulación es confirmar que el modelo de simulación se ha aplicado correctamente. En otras palabras, se ha utilizado el modelo

conceptual para construir el modelo de simulación por computadora. En nuestro caso, se verificó que la conceptualización y la traducción concuerdan con el plan real proporcionado por la empresa. El plan real se muestra en el gráfico:



Figura 15.- Plano de instalaciones reales de Novacargo

Validación

A diferencia de la verificación, la validación es un proceso importante en la simulación. Este paso busca determinar si el modelo representa con precisión el sistema real que se está simulando, mientras que la verificación se centra en asegurar que el modelo se haya implementado correctamente. Para ello, comparamos los resultados obtenidos al ejecutar la simulación durante dos meses con los datos históricos obtenidos en el mismo período. Estos corresponden a enero y febrero de 2025. Cabe destacar que, debido a la variedad de productos que maneja como carga sobredimensionada, Novacargo puede paletizar con diferentes unidades. Es decir, hay pallets completamente ensamblados, con 4 SKIDs, otros con 3 SKIDs, 2 y 1. Según datos de la empresa, el porcentaje de despacho es el siguiente:

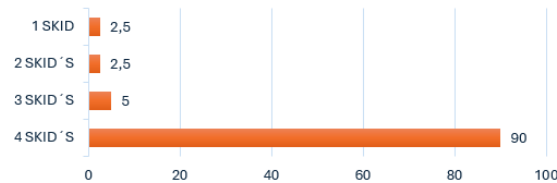


Figura 16.- Distribución de número de Skids por ULD.

También es importante recordar que la perspectiva de crecimiento de la empresa era para este año. Como se mencionó anteriormente, el porcentaje esperado es del 9%. A continuación, se muestra el resultado de la simulación.

Tabla 4.- Resultados de la simulación

Objeto	Throughput
Despacho_Muelle 19	2068

Los datos reales muestran que, entre enero y febrero de 2025, se despacharon 8.614 skids, mientras que la simulación de datos históricos muestra 7.910. Esto indica que, en 2025, la empresa experimentó un crecimiento del 8,18 %, muy cercano al 9 % que refleja la realidad. Estos datos nos permiten confirmar que la simulación es idéntica a la realidad.

Diseño experimental

El diseño experimental en simulación consiste en determinar factores influyentes en el resultado a evaluar, y sus respectivos niveles. Además, establecer el número de réplicas necesarias para obtener resultados estadísticamente robustos. (Montgomery, 2019). Para este estudio, los factores y niveles determinados se enumeran a continuación.

Tabla 5.- Diseño experimental

Factor experimental	# de niveles	Niveles
Número de escáneres de gran tamaño	2	1,2
# de operadores del muelle 19	3	3,4,5

Este diseño experimental se diseñó con seis escenarios, cinco réplicas por escenario y una sola ejecución, lo que permitió obtener estimaciones fiables del rendimiento del sistema. Según Law, (2015), el uso de múltiples réplicas es esencial para reducir la variabilidad de los resultados y mejorar la precisión estadística. Con cinco réplicas, se logra un equilibrio entre la reducción del error estándar y la eficiencia computacional, lo que garantiza conclusiones robustas sin incurrir en costos excesivos. Tras el análisis, los hallazgos se documentaron y reportaron para su implementación en el marco DMAIC. Esto abarca los últimos pasos del proceso de simulación.

Tras el análisis realizado respecto al DOE, se evidenció que el implementar un nuevo operador es fundamental para el proceso operativo de Novacargo. Pues su proceso actual muestra la utilización mostrada en la figura 16, mientras que al aumentar un operador las utilizaciones se distribuyen como se muestra en la figura 17.

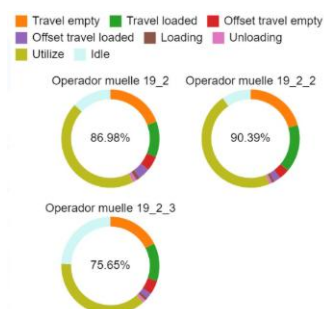


Figura 17.- % de utilización con 3 operadores

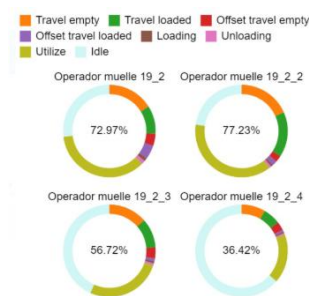


Figura 18. -% de utilización con 4 operadores

Como se puede ver en la figura 17, las utilizaciones superan el 85% lo mismo que puede generar un aumento en el cansancio tanto físico como mental de los operadores. Esto, a su vez, incrementa el riesgo de cometer errores, sufrir accidentes laborales y deteriorar la calidad del servicio ofrecido. De igual manera, una alta carga de trabajo suele implicar la necesidad de recurrir a horas extras, lo que no solo incrementa los costos operativos, sino que también puede afectar la motivación y el bienestar del personal a largo plazo. (Ramdass et al., n.d.) Al

aumentar un cuarto operador, este porcentaje baja significativamente. Sin embargo, al ser el resultado de un software, estos resultados pueden tener cierta incertidumbre en cuanto al resultado real, por lo que se necesitaría una indagación más profunda para también evitar ocio durante sus tareas.

Además, se recomienda realizar una inversión que involucra la implementación de un transportador y elevador de pallets eléctrico. **(Apéndice 7)** Pues, en las operaciones de Novacargo, donde el manejo de cargas voluminosas es habitual en jornadas extensas y con mucha presión, optar por un elevador de pallets eléctrico ofrece claras ventajas ergonómicas y de salud laboral sobre uno hidráulico. (Unilift, 2025). Mientras que los modelos hidráulicos exigen esfuerzo manual para elevar y bajar la carga, los eléctricos automatizan por completo esta acción, lo que disminuye significativamente el estrés físico en los operarios. Esta diferencia es crucial para evitar lesiones musculoesqueléticas, especialmente en la espalda baja, hombros y muñecas, áreas comúnmente afectadas por la manipulación repetitiva de cargas. Además, los elevadores eléctricos reducen la fatiga, lo que se traduce en mayor productividad y precisión al mover pallets, factores vitales en un entorno como el Muelle 19, donde cualquier demora o equivocación puede generar costos adicionales. Ergonómicamente, el equipo eléctrico permite ajustar la altura de forma más precisa y segura, facilitando posturas de trabajo correctas al cargar y descargar, sin necesidad de inclinarse o levantar peso continuamente. Esto concuerda con las normativas de seguridad industrial y ergonomía, que recomiendan la automatización para disminuir riesgos y mejorar el bienestar del personal. En definitiva, la adopción de elevadores eléctricos no solo agiliza el trabajo en términos de rapidez y eficiencia, sino que también es una inversión en la salud de los empleados, reduciendo las ausencias por lesiones y promoviendo un ambiente laboral más seguro y duradero.

La implementación de un carro hidráulico eléctrico de pallets, con un costo aproximado de \$12,900, representa una inversión estratégica para mitigar los riesgos ergonómicos y reducir

los costos asociados a las lesiones musculoesqueléticas (LME) en operadores logísticos en Ecuador. Estas lesiones, como la lumbalgia y el síndrome del túnel carpiano, son comunes en actividades que implican manipulación manual de cargas y posturas forzadas, y generan gastos significativos para las empresas debido a ausentismo, pérdida de productividad y compensaciones médicas. (Organización Internacional del Trabajo, 2019).

Según estudios realizados en Ecuador, las LME son responsables de una alta incidencia de ausencias laborales y disminución en la eficiencia operativa. Además, se ha identificado un subregistro en la notificación de enfermedades profesionales, lo que sugiere que los costos reales podrían ser aún mayores. (Ministerio de Salud Pública del Ecuador, 2022).

La adquisición de un carro hidráulico eléctrico puede reducir significativamente la carga física sobre los trabajadores, disminuyendo la probabilidad de lesiones y, por ende, los costos asociados. Aunque la inversión inicial es considerable, los beneficios a largo plazo, como la reducción de ausentismo y mejoras en la productividad, pueden compensar y superar este gasto. (Tames-Mendoza, 2020)

En conclusión, la implementación de equipos ergonómicos como el carro hidráulico eléctrico no solo mejora las condiciones laborales y la salud de los trabajadores, sino que también representa una decisión económicamente beneficiosa para las empresas logísticas en Ecuador.

5.5. Controlar

Tras realizar una simulación de eventos discretos basada en los datos históricos de la empresa desde 2023, la etapa de Controlar se convierte en el puente fundamental hacia la implementación de un gemelo digital. Esta fase no solo asegura la sostenibilidad de las mejoras implementadas, sino que habilita la transición desde un modelo estático hacia un sistema dinámico que interactúa con datos en tiempo real.

La integración de los indicadores clave (KPIs) con bases de datos y sistemas paralelos permite alimentar constantemente el modelo simulado, transformándolo en una réplica digital precisa del sistema logístico. Este gemelo digital posibilita una monitorización continua de los procesos, la detección anticipada de ineficiencias y una capacidad de reacción inmediata ante desviaciones. De hecho, existen diferentes autores como Bahadori (2024) o Nsekuye (2024) que confirman la alta relevancia que esta herramienta tiene. Entre estas están:

- **Disminución de la variabilidad:** La supervisión constante del proceso contribuye a reducir fluctuaciones indeseadas, lo que se traduce en una mejora sustancial de la calidad del resultado final.
- **Uso eficiente de los recursos:** La posibilidad de evaluar múltiples escenarios mediante simulación favorece una planificación más precisa y una asignación óptima de recursos, lo que implica una disminución de los costos operativos.
- **Actuación anticipada:** La identificación temprana de desviaciones facilita la implementación de medidas preventivas, evitando que pequeños desajustes escalen a problemas mayores.
- **Mejora continua y sostenible:** La retroalimentación permanente del sistema permite realizar ajustes progresivos, impulsando una cultura organizacional orientada al perfeccionamiento constante.

Así, la fase de Controlar no se limita al seguimiento posterior a la mejora, sino que se convierte en una arquitectura de control predictivo y gestión proactiva, características esenciales de los gemelos digitales dentro del marco de la Industria 4.0. En este contexto, la empresa no solo garantiza la estabilidad de sus operaciones, sino que se posiciona estratégicamente para responder con agilidad a la variabilidad del entorno logístico global.

En el contexto operativo de Novacargo, donde el crecimiento sostenido de la demanda y las exigencias logísticas del transporte aéreo imponen retos cada vez mayores, la fase de Controlar adquiere un papel estratégico más allá del monitoreo convencional. La capacidad de transformar los resultados obtenidos a través de la simulación en un sistema interconectado y en tiempo real permite dar un paso firme hacia la implementación de un gemelo digital. Esta evolución no solo responde a la necesidad de mantener los estándares operativos y reducir riesgos asociados a la variabilidad y los retrasos, sino que también ofrece a la empresa una plataforma predictiva y dinámica que fortalece la toma de decisiones. En este sentido, el gemelo digital no es únicamente una herramienta tecnológica, sino una extensión del proceso logístico de Novacargo, capaz de adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno y garantizar una gestión proactiva basada en datos reales.

1. Implementación de gemelos digitales

Para llevar a cabo la implementación del gemelo digital en Novacargo, se tuvieron que realizar las conexiones correspondientes al modelo simulado con fuentes de datos en tiempo real, permitiendo así la construcción de una réplica virtual dinámica del proceso logístico. Para esto, se tuvo acceso a la base de datos proporcionada por la empresa, la misma que consiste en un espejo de la original que la empresa tiene como respaldo. Esta base, trata de un SQL Server, un sistema de gestión de datos que utiliza un lenguaje de consulta estructurado. Por esta razón, fue fundamental realizar las consultas necesarias una vez identificado el reporte de protocolo donde la información relevante se almacena. En la tabla 5 se muestran los diferentes accesos a información que se tiene en la base de datos y se indica cuáles fueron aquellos utilizados para la simulación en tiempo real.

Tabla 6.- Información de las tablas de la base de datos

Base de datos	Tablas	Campos	Utilización
DWPERISHABLECENT ERBI	Dbo.Camiones.Totales.Dias		NO
	Dbo.Camiones.xDias		NO
	Dbo.Estadisticas.Contabilidad		NO
	Dbo.MuelleIngreso		NO
	Dbo.rptRegistroVehiculo	<ul style="list-style-type: none"> • [Fecha] • [Muelle] • [numIngreso] • [selloSeg] • [Placa] • [Conductor] • [Identificacion] • [Guia] • [CargaTipo] • [Agencia] • [Piezas] • [Peso] • [HoraLlegada] • [HoraIngMuell e] • [HoraIniRecp] • [HoraFinRcp] • [HoraDespacho] • [TiempoParque o] • [TiempoEspera] • [TiempoRecep cion] • [TiempoDespa cho] • [TiempoTotal] 	Si

Una vez identificada la información relevante, fue fundamental la integración de SQL con FlexSim, como se mencionó previamente, la versatilidad de este software permite al

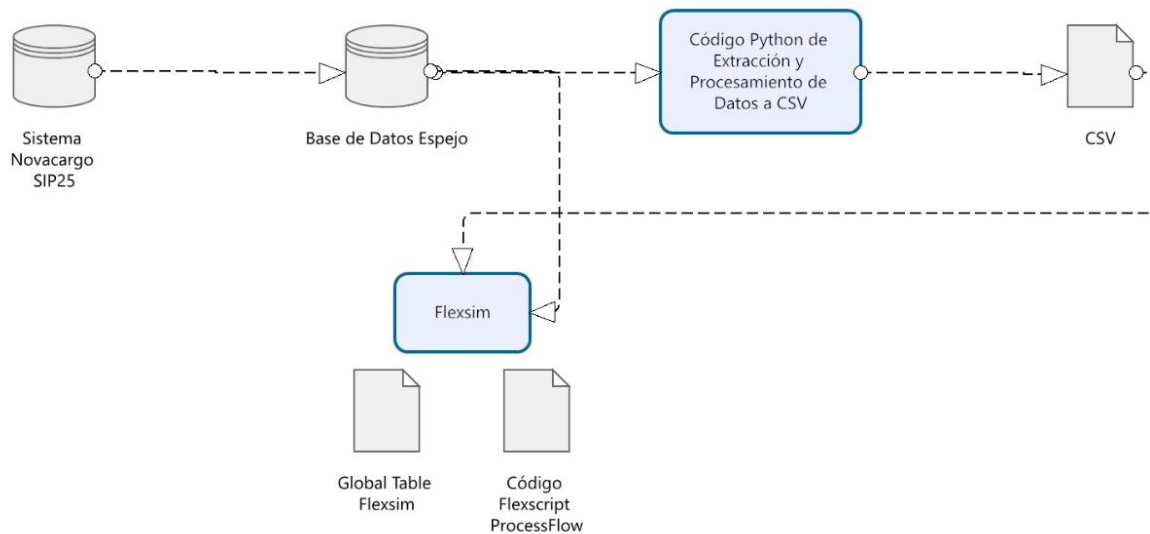


Figura 19.- Orden de conexión directa entre la base de datos espejo a csv y FlexSim

usuario alcanzar diferentes objetivos. Una vez importados los datos necesarios en FlexSim, se siguió el proceso que se muestra a continuación en términos de conexiones.

De igual manera, en esta sección se evidencia claramente el manejo de datos, pues para lograr la conexión de datos real en los orígenes de la simulación que en este caso representarían la llegada de camiones, se tuvo que realizar un análisis externo a la base de datos para poder utilizar una nomenclatura binaria que indicase la llegada o no de camiones. Recordando el concepto de la simulación de eventos discretos la misma que se caracteriza por analizar los cambios que ocurren en momentos específicos del tiempo. Entonces:

$i = 1$ Representación de la llegada de un camión

$i = 0$ Muelle desocupado

Donde i = Variable binaria llegada de camiones

Para esto, fue necesaria una conexión por medio de un código de Spyder que permitiese la extracción de datos en formato.csv. Este archivo fue después importado al sistema de

FlexSim en forma de tabla global con el fin de poder usar esa información. El proceso para esta implementación se describe en la figura 18. También es fundamental recalcar que la actualización de la información cargada en la base de datos depende del ingreso de los operadores en sus respectivos perfiles. Por lo que actualmente, existe un retraso aproximado de cuarenta minutos en el lapso de actualización de información.

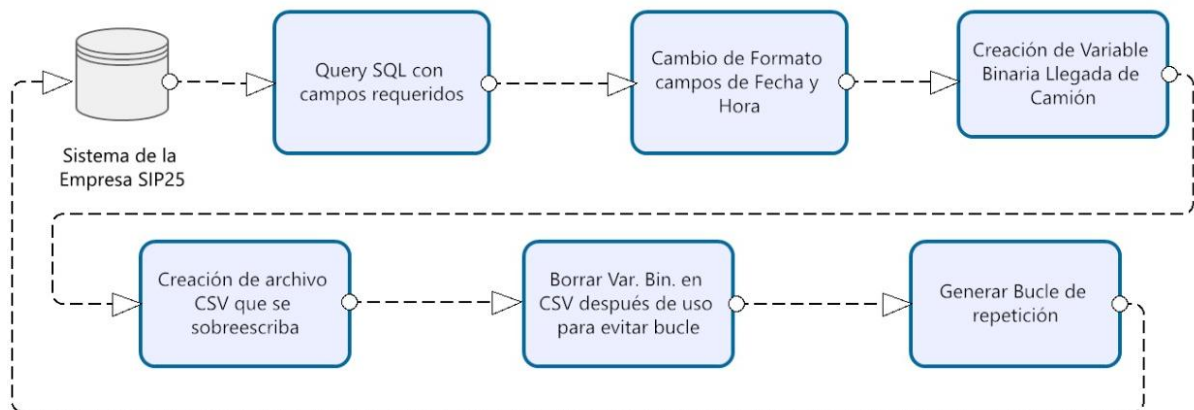


Figura 20.- Orden de conexión directa entre la base de datos espejo y FlexSim

Para el tiempo de procesamiento de las unidades se usó la conexión directa de la base de datos espejo al software FlexSim. Donde a base de queries se importó la información sobre el tiempo de descarga de cada pieza a una tabla global en FlexSim. Una vez obtenida la tabla global se unió esta tabla con el escáner sobredimensionado de la simulación, donde la primera fila de información correspondía al camión que estaba siendo descargado. Usando el primer registro de la tabla con su correspondiente columna se programó los tiempos de descarga de cada skid. Esto, se logró gracias a la herramienta de Process Flow la cual es una funcionalidad de FlexSim que permite generar un bucle para la consulta de datos desde el SQL Server hacia tablas globales de FlexSim. El proceso de esta etapa se muestra en la figura 20.

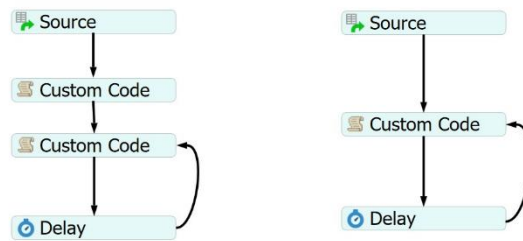


Figura 21.- Process flow para el gemelo digital

Al igual que con el tiempo de procesamiento, la cantidad de piezas fue determinada con la conexión directa de la base de datos espejo a FlexSim. Para esto a base de consultas se pasó la información sobre cada camión a una tabla global del software. Con esta tabla se pudo determinar el número de piezas por camión, ya que, se usó la primera fila de esta tabla con la columna TotalPiezas y se pudo conectar esta información con simulación.

Con esta serie de pasos, se logró implementar el concepto de gemelos digitales. Sin embargo, al utilizar la base de datos espejo proporcionada por la empresa, esta representación depende de la actualización de datos manual por parte de los operadores respectivos en cada parte del proceso. Por esto, se podrían encontrar retrasos de 40 minutos en el reflejo de estos datos, lo mismo que demuestra ser una limitación para esta investigación.

La utilización del gemelo digital en Novacargo es un avance significativo en la gestión de la logística de la carga de gran tamaño. Al monitorear el proceso en tiempo real, esta herramienta puede detectar cuellos de botella y evaluar la operación con información actualizada. Ha tenido éxito en reflejar eventos del mundo real como los tiempos de descarga y los camiones, con un período controlado de aproximadamente 40 minutos cuando se integró con la base de datos espejo. Esto facilita la toma de decisiones rápida e informada, anticipando posibles desviaciones y validando estrategias de mejora sin afectar la operación real. Además, el gemelo digital facilita la simulación de diversos escenarios, lo que resulta en la utilización óptima de recursos como el personal y el equipo, así como la reducción de los gastos operativos y los retrasos penalizantes. Proporciona una base sólida para prepararse para una futura

expansión, incorporar el mantenimiento predictivo y desarrollar un sistema logístico más ágil, escalable y sostenible. Además de mejorar su eficiencia interna, Novacargo también sirve como un punto de referencia tecnológico en el sector logístico de Ecuador, cumpliendo con el futuro de la industria emergente y mejorando su capacidad para competir con el transporte aéreo global.

6. RESULTADOS

Los resultados hasta la fecha son los obtenidos a partir de los KPIs. Estos indican un rendimiento de 2.068 ULD con los porcentajes mencionados en el gráfico: esto, como se mencionó en la fase de Mejorar, muestra solo un 0,82% de error en comparación con el crecimiento del 9% que la empresa esperaba para 2025. Además, la tasa de utilización del escáner de carga sobredimensionada fue del 29,08%. Un porcentaje que indica un rendimiento bastante inactivo. Sin embargo, es comprensible en el contexto, ya que no debe olvidarse que este escáner solo procesa el 11% de la carga que maneja la empresa. De igual manera, se encontró que el tiempo promedio en cola antes del ensamblaje de los ULD es de 7.408,7 segundos, es decir, 123,47 minutos, lo que puede indicar un posible cuello de botella. En cuanto al tiempo de descarga, el promedio es de 1.526 segundos, o aproximadamente 25 minutos. Este tiempo está en línea con las operaciones reales del almacén. Finalmente, está el porcentaje de utilización de los operadores del Muelle 19. Dos de ellos presentan un porcentaje superior al 85%, lo cual no es conveniente, ya que un porcentaje superior al 85% o al 90% genera retrasos en los clientes y horas extras del personal. Sin embargo, el análisis realizado en el DOE reveló una oportunidad viable para mejorar el proceso de producción. Para lograrlo, la mejor opción era añadir un operador adicional. Esto también reduce la utilización de los operadores a niveles altos, manteniendo al mismo tiempo los límites de sobrecarga. Asimismo, se reduce el tiempo de espera en la cola antes del ensamblaje, lo que mejora el cuello de botella. Ahora se reduce a 6272 segundos, es decir, 104 minutos.

De igual manera, durante la etapa de validación del gemelo digital, se comprobó que los datos provenientes de la base de datos espejo se incorporan de manera dinámica al entorno simulado. Un caso puntual se observó en una de las pruebas realizadas, cuando un camión ingresó físicamente a las instalaciones de Novacargo a las 19:54. Debido al retraso previamente identificado en la actualización de la base de datos estimado en aproximadamente 40 minutos, dicho ingreso fue registrado en la simulación a las 20:37. Aunque este desfase era previsible, permitió corroborar el funcionamiento del sistema, demostrando su capacidad para reflejar los eventos casi en tiempo real. Este comportamiento reafirma el valor del gemelo digital como herramienta para replicar con fidelidad las operaciones logísticas de la empresa, pese a que aún depende de ciertos procesos manuales. Aun con esta latencia reconocida, la sincronización obtenida permite generar una representación confiable del sistema, facilitando la toma de decisiones basada en datos reales.

7. DISCUSIÓN

El estudio realizado en el almacén aeroportuario de Novacargo, centrado en la operación del Muelle 19 para carga sobredimensionada, identificó puntos críticos que afectan la eficiencia operativa, como retrasos causados por ineficiencias, que resultan en advertencias y sanciones económicas por parte de las aerolíneas. Estos problemas fueron abordados a través de simulaciones basadas en la metodología DMAIC, lo que permitió evaluar diversos escenarios de mejora y proyectar su impacto a corto y mediano plazo.

Uno de los hallazgos relevantes fue la baja utilización del escáner destinado a carga sobredimensionada, con un 29,08%, lo cual, si bien puede parecer ineficiente, se justifica por el hecho de que solo procesa el 11% del volumen total de carga. No obstante, esto también representa una oportunidad para optimizar su uso o redistribuir recursos en temporadas de baja demanda.

Asimismo, se identificó un cuello de botella en la etapa de ensamblaje de ULD, con un tiempo promedio de espera previo al ensamblaje de 7408,7 segundos, aproximadamente 123 minutos. Además, se detectó una sobrecarga operativa, evidenciada por tasas de utilización superiores al 85% en algunos operadores del Muelle 19, lo cual puede comprometer tanto la productividad como el bienestar del personal. El diseño de experimentos (DOE) permitió demostrar que la incorporación de un operador adicional era la solución más eficiente, logrando reducir el tiempo de espera a 6272 segundos, es decir, 104 minutos y equilibrando la carga de trabajo del equipo.

Más allá de estas mejoras puntuales, uno de los avances más significativos del estudio fue la implementación de un gemelo digital mediante la integración de FlexSim con datos provenientes de una base de datos espejo. Esta conexión permitió crear una réplica virtual del sistema logístico de Novacargo, capaz de actualizarse dinámicamente conforme se alimentan nuevos datos. Durante las pruebas, por ejemplo, se documentó el ingreso de un camión a las 19:54, el cual fue reflejado en la simulación a las 20:37 debido a un desfase operativo en la actualización de datos. A pesar de esta latencia de aproximadamente 40 minutos, el modelo demostró su capacidad para representar fielmente las operaciones reales, consolidando su utilidad como una herramienta de análisis y toma de decisiones.

Este enfoque refuerza el rol estratégico del gemelo digital dentro del marco de la Industria 4.0, ya que no solo permite observar el comportamiento del sistema en tiempo casi real, sino que también posibilita anticiparse a desviaciones, probar escenarios y planificar de manera más eficiente los recursos. Así, la combinación de simulación tradicional con tecnologías de gemelos digitales representa un avance hacia una logística más inteligente, adaptable y sostenible para empresas como Novacargo.

8. CONCLUSIÓN

La implementación de la metodología DMAIC, junto con la simulación de eventos discretos, permitió caracterizar y optimizar el proceso de paletización de carga sobredimensionada en el almacén de Novacargo. El estudio confirmó que el escáner del Muelle 19 opera con un nivel de utilización del 29,08%, lo cual refleja una baja demanda relativa del equipo, pero también evidencia una capacidad disponible que puede ser aprovechada estratégicamente en futuras configuraciones operativas.

De igual manera, se identificó un cuello de botella crítico en la etapa de ensamblaje de ULD, provocado por la alta carga operativa del personal. Mediante el diseño de experimentos, se propuso la incorporación de un operador adicional, lo cual permitió reducir significativamente los tiempos de espera y mejorar la distribución del trabajo, contribuyendo a un sistema más eficiente y sostenible.

Sin embargo, uno de los aportes más innovadores de este estudio fue la implementación de un gemelo digital a través de la integración de FlexSim con una base de datos espejo en SQL Server. Esta implementación permitió replicar dinámicamente el sistema logístico de Novacargo, generando una representación virtual que refleja fielmente la operación real. A pesar de un desfase temporal de aproximadamente 40 minutos derivado del proceso manual de actualización de datos, el sistema demostró ser eficaz en la visualización casi en tiempo real de eventos clave, como el ingreso de camiones y los tiempos de procesamiento asociados.

Este gemelo digital no solo permite validar decisiones antes de implementarlas físicamente, sino que también se convierte en una plataforma predictiva y proactiva para la gestión logística. Su uso garantiza una toma de decisiones basada en datos actualizados, reduce la variabilidad de los procesos, y permite una mejora continua del sistema. En este contexto, Novacargo no solo logra optimizar su operación actual, sino que se posiciona como una empresa preparada para los desafíos de la logística moderna bajo los principios de la Industria 4.0.

9. REFERENCIAS

- AIN POINTS Data on Work Intensity, Monitoring, and Health at Amazon Warehouses.* (n.d.).
- Ali, S., Ramos, A. G., Carravilla, M. A., & Oliveira, J. F. (2022). On-line three-dimensional packing problems: A review of off-line and on-line solution approaches. *Computers and Industrial Engineering*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108122>
- Attaran, M., & Celik, B. G. (2023). Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165>
- Bahadori, S. (2024). Digital twins in logistics: Real-time optimization through data integration. *Journal of Logistics and Digital Innovation*, 12(1), 45–60. <https://doi.org/10.1016/j.jldi.2024.01.004>
- Banks, Jerry. (2014). *Discrete-event system simulation*. Pearson.
- Barnes, E. (1969, September 4). Interview with Eva Barnes – Part 1 [Real Media file]. Recuperado de <http://www.studsterkel.org/dstreet.php>
- Beaverstock, M., & Greenwood, A. (2017). *Fifth Edition Compatible with FlexSim 2017 LTS*. www.flexsim.com
- Brandt, F., & Nickel, S. (2019). The air cargo load planning problem - a consolidated problem definition and literature review on related problems. In *European Journal of Operational Research* (Vol. 275, Issue 2, pp. 399–410). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.013>
- Brett, D. (2023). Monthly cargo statistics reveal Latin America as fastest-growing region. IATA. <https://www.iata.org/en/pressroom/2023-releases/2023-08-15-01/> (Ejemplo basado en una posible fuente; verifica si tienes el enlace exacto o nombre completo del documento)
- Brett,D. (2024, January 22). *Quito expands flower processing area as it prepares for busy Valentine's season*.
- Bughin, J., Laberge, L., & Mellbye, A. (2017). *The case for digital reinvention*.
- Cuñat Negueroles, S., Reinosá Simón, R., Julián, M., Belsa, A., Lacalle, I., S-Julián, R., & Palau, C. E. (2024). A Blockchain-based Digital Twin for IoT deployments in logistics and transportation. *Future Generation Computer Systems*, 158, 73–88. <https://doi.org/10.1016/j.future.2024.04.011>
- Díaz-Martínez, C., Romero-Hernández, O., & Osorio-Gómez, L. (2018). Simulation-based decision support using FlexSim: Applications in healthcare and manufacturing. *International Journal of Simulation Modelling*, 17(4), 543–554. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM17\(4\)451](https://doi.org/10.2507/IJSIMM17(4)451)

- Erguido, A., Martínez-Olvera, C., & González-Ramírez, R. (2023). Digital twin applications in air cargo logistics: A review and research agenda. *Computers & Industrial Engineering*, 176, 109022. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109022>
- ExpoFlores. (2018). *Crecimiento 2022-2023 Exportaciones no petroleras*. www.expoflores.cominfo@expoflores.com
- EXPORTACIONES Ecuador 2023. (2023). *Ecuador - Exportaciones de Mercancías*.
- Flexsim. (2024). *Flexsim About us*.
- Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles. In 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference (p. 1818). <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>
- Greenwood, A. G. (n.d.). *Why FlexSim Simulation Software?* www.flexsim.com
- IATA. (2024). *Strengthened Profitability Expected in 2025 Even as Supply Chain Issues Persist*.
- Ibrahim, A., & Kumar, G. (2025). Identification and Prioritization of Critical Success Factors of a Lean Six Sigma–Industry 4.0 Integrated Framework for Sustainable Manufacturing Using TOPSIS. *Sustainability (Switzerland)*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/su17031331>
- IFS. (2025). Cargas de importación | Grupo IFS Perú. <https://www.ifssac.com/cargas-importacion>
- Jerry Banks. (n.d.). *Discrete Event System Simulation - 5th Ed - Banks-Ch1 (1)*.
- Kelton, W. D., Sadowski, R. P., & Zupick, N. B. (2015). *Simulation with Arena* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Kumar Kushwaha, D., Sen, G., Aakash, A., & Thomas, S. (2024). Air cargo transportation, loading, and phase-based maintenance service scheduling in demand channel routes. *Computers and Industrial Engineering*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110341>
- Law, A. M. . (2015). *Simulation modeling and analysis*. McGraw-Hill Education.
- Lewicki, W., Niekurzak, M., & Wróbel, J. (2024). Development of a Simulation Model to Improve the Functioning of Production Processes Using the FlexSim Tool. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/app14166957>
- Marco Antonio Díaz-Martínez, Ricardo Zárate-Cruz, & Reina Verónica Román-Salinas. (2018, April 11). *Simulación Flexsim, una nueva alternativa para la ingeniería hacia la toma de decisiones en la operación de un sistema de múltiples estaciones de prueba*. Simulación Flexsim, Una Nueva Alternativa Para La Ingeniería Hacia La Toma de Decisiones En La Operación de Un Sistema de Múltiples Estaciones de Prueba.

- MarketsandMarkets. (2020). Digital twin market by technology, type, application, industry, and region—Global forecast to 2025. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html>
- Mesquita, A. C. P., & Sanches, C. A. A. (2024). Air cargo load and route planning in pickup and delivery operations. *Expert Systems with Applications*, 249. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123711>
- Migracion En El Aeropuerto De San Pedro Sula, A. E., & Ocampo, J. (2013). *APLICANDO LA METODOLOGIA DMAIC-SIM A LA MEJORA DEL TIEMPO DE*. <https://www.researchgate.net/publication/264044288>
- Ministerio de Salud Pública del Ecuador. (2022). Informe nacional sobre salud ocupacional y enfermedades profesionales. <https://www.salud.gob.ec>
- Mohamed, M., Metwaly, A. A., Ibrahim, M., Smarandache, F., & Voskoglou, M. (2024). Partnership of Lean Six Sigma and Digital Twin under Type 2 Neutrosophic Mystery Toward Virtual Manufacturing Environment: Real Scenario Application. *Sustainable Machine Intelligence Journal*, 8. <https://doi.org/10.61356/smij.2024.8302>
- Montgomery, D. C. (2019). Introduction to statistical quality control (8th ed.). Wiley
- Mora García Luis Anibal. (2015). *KPIs (1)*.
- Nahmias, S. (1979). *Análisis de la producción y las operaciones, 5ta Edición*.
- Nahum, O. E., Hadas, Y., & Kalish, A. (2019). A Combined Freight and Passenger Planes Cargo Allocation Model. *Transportation Research Procedia*, 37, 354–361. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.203>
- Nordgren, W. B. (n.d.). *FLEXSIM SIMULATION ENVIRONMENT*.
- Nsekuye, J. B., Erramli, O., Elouadi, A., Gretete, D., & Mushirabwoba, B. (2024). DMAIC-v2: A Novel Guide to the Improvement of Industrial Processes. *Smart and Sustainable Manufacturing Systems*, 8(1), 24–58. <https://doi.org/10.1520/SSMS20220037>
- Ocampo, J. R., & Pavón, A. E. (n.d.). *Integrando la Metodologia DMAIC de Seis Sigma con la Simulacion de Eventos Discretos en Flexsim*.
- Ocampo Jared, & Pavón Aldo. (2012). *Integrando la Metodologia DMAIC de Seis Sigma con la Simulacion de Eventos Discretos en Flexsim*. 68.
- Organización Internacional del Trabajo. (2019). Seguridad y salud en el centro del futuro del trabajo: Aprovechar 100 años de experiencia. https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_protect/---protrav/---safework/documents/publication/wcms_686645.pdf
- PierNext. (2022, septiembre 23). Simulación y realidad virtual: así es la nueva formación logística. <https://piernext.portdebarcelona.cat/personas/simulacion-y-realidad-virtual-nueva-formacion-logistica/>

- Quiport. (2024). Informe anual de operaciones y desarrollo aeroportuario 2024.
<https://www.quiport.com/>
- Ramdass, K. R., Doyoyo, F. P., & Mncwango, B. T. (n.d.). *The Evaluation of Station Workload Through the Application of Work-Study Principles: A Case Study in the Automotive Industry*.
- Rodriguez, J. P. (2020). *The geography of transport systems* (5th ed.). Routledge.
<https://transportgeography.org/>
- Ruiz-López, S. E. (2024). Estrategias de Gestión de la Cadena de Suministro en un Mundo Globalizado. *Revista Científica Zambos*, 3(2), 97–119.
<https://doi.org/10.69484/rcz/v3/n2/19>
- Saad, S., Bahadori, R., Khamkham, M., & Adi, K. (2024). THE IMPACT OF THE DIGITAL ERA ON THE IMPLEMENTATION OF THE TRADITIONAL SIX-SIGMA DMAIC- A NEW DMAISE CYCLE DEVELOPMENT. *International Journal of Industrial Engineering : Theory Applications and Practice*, 31(1), 84–100. <https://doi.org/10.23055/ijietap.2024.31.1.9383>
- Sancia. (2024). 2024 Global Air Freight Industry Review: Challenges and Resilience. *JUSDA-EN*.
- Sharma, R., & Rao, P. R. (2021). Application of cause and effect diagram in quality problem-solving. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 38(4), 1020–1035. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-04-2020-0132>
- SKYPALLET. (s. f.). Smart air cargo load planning software.
<https://www.skypallet.aero/>
- StarUs Insights. (2025). *Air Freight Report 2025: Insights of the Year*. StarUs Insights.
- Sokovic, M., Pavletic, D., & Kern Pipan, K. (2010). Quality improvement methodologies – PDCA cycle, RADAR matrix, DMAIC and DFSS. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 43(1), 476–483.
https://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol43_1/43176.pdf
- Sustainability. (2024). The role of real-time monitoring in Six Sigma control phase. *Sustainability*, 16(2), Article 2345. <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/2/2345>
- Tako, A. A., & Robinson, S. (2020). Model development in discrete-event simulation and system dynamics: An empirical study of expert modellers. *European Journal of Operational Research*, 282(1), 273–283.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.09.010>
- Tames-Mendoza, N. (2020). Ergonomía aplicada a la mejora de procesos logísticos: Evaluación costo-beneficio de herramientas asistidas. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://repositorio.unam.mx/>
- Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. (2018). Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 157–169.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>

- Tyler, D. C., Pasquariello, C. A., & Chen, C. H. (2003). Determining optimum operating room utilization. *Anesthesia and Analgesia*, 96(4), 1114–1121.
<https://doi.org/10.1213/01.ANE.0000050561.41552.A6>
- Unilift. (2025). *Transportador y elevador de pallets*. UNILIFT.
- Vashishth, T. K., Sharma, V., Sharma, K. K., Kumar, B., Chaudhary, S., & Panwar, R. (2024). Digital twins solutions for smart logistics and transportation. In *Digital Twins for Smart Cities and Villages* (pp. 353–376). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-443-28884-5.00016-6>
- Vásquez, R. (2025, Marzo 2). Entrevista con Rolando Vásquez.
- Vimal K. E. K., Divya Rashmib, Sivakumar K., Paranitharan K., & Balaji Venkataraman. (2022). *Developing a Delphi assisted total interpretive structural model (D-TISM) for adopting the Industry 4.0 technologies within Lean Six Sigma framework*.
- VIVA-Tech. (2023). Smart dashboards and control systems for continuous improvement.
<https://www.vivatechnology.com/insights>
- World Economic Forum. (2023). The Future of Jobs Report 2023.
<https://www.weforum.org/publications/the-future-of-jobs-report-2023/>
- World Trade Organization (WTO). (2023). World trade statistical review 2023.
https://www.wto.org/english/res_e/statis_e/wts2023_e/wts2023_e.pdf
- Yao, S., Zhang, T., Zhang, H., Qiu, J., Leng, J., Liu, Q., & Wei, L. (2024). *The semi-online robotic pallet loading problem*. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106889>
- Yi, X., Tang, L., Cheng, R., Yin, M., & Zheng, Y. (2025). Domain ontology to integrate building-integrated photovoltaic, battery energy storage, and building energy flexibility information for explicable operation and maintenance. *Computers in Industry*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2025.104250>
- Yung Po Tsang, Shixin Song, Liang Xu, & Carman Ka Man Lee. (2024). A Simulation Analysis of the Co-loading Strategy in the Air Freight Process. *ACM*.
- Zhang, Q., Irfan, M., Aamir, M., Khattak, O., Zhu, X., & Hassan, M. (2012). *INTERDISCIPLINARY JOURNAL OF CONTEMPORARY RESEARCH IN BUSINESS Lean Six Sigma: A Literature Review*.

10.Apéndices

Apéndice 1

VOZ DEL CLIENTE	PROBLEMA CLAVE	REQUISITO DEL CLIENTE	CRÍTICO DE LA CALIDAD
“El proceso de carga sobredimensionada cuenta con deficiencias operativas, generando así costos elevados y retrasos significativos para la empresa”	La empresa ha tenido que asumir altos costos que rondan entre \$2000 y \$10000 por un promedio del 0,5% de retrasos hacia las aerolíneas.	Mejorar la eficiencia operativa respecto al proceso de paletización de carga sobredimensionada.	Optimización del proceso de paletización de carga sobredimensionada para reducir costos y retrasos operativos.
“El proceso de carga sobredimensionada tiende a ser poco supervisado debido a la ubicación de este en el diseño”	En temporada alta, el supervisor presta mayor atención al resto de muelles.	Asegurar un mayor control en todos los muelles de manera equitativa.	Optimización del diseño actual dentro del centro de distribución
“El proceso de carga sobredimensionada puede resultar incómodo debido a la falta de espacio de maniobras que se tiene en el área del muelle 19”	Existe poco espacio entre la zona de almacenamiento y el escáner.	Mejorar la distribución de la zona que corresponde al muelle 19.	Optimización del espacio dentro del centro de distribución.
“El espacio asignado al muelle 19 no tiene concordancia con el tipo de carga que se maneja, pues a diferencia del resto de muelles, en este caso el espacio es reducido”	Si bien se transportan elementos con medidas más altas, el espacio no resulta adecuado en comparación al espacio que se tiene para el resto de los muelles.	Organizar de mejor manera los muelles.	Optimizar el espacio del muelle para que este sea suficiente para acomodar la carga sin afectar el flujo de operaciones.
“Existe riesgo considerable de accidentes debido a caídas desde los pallets más altos ya golpes que se pueden dar en la cotidianidad”	Los pallets pueden llegar a medir incluso tres metros, lo mismo que ha ocasionado caídas debido a fallas en los sistemas de seguridad.	Fomentar la seguridad industrial dentro de la empresa.	Mejoras en el área de SSA.

Apéndice 2

Project Charter

Problem Statement

The current process for handling oversized cargo has operational deficiencies that generate high costs and delays in delivery to airlines. This occurs at the distribution center of the NovaCargo company, which only has one dock for oversized cargo (dock 19). In fact, within the operations of handling oversized cargo there are delays of around 0.5%, the impact of which can generate costs from \$2,000 to \$10,000, affecting the entire supply chain of the company in addition to the previously mentioned economic losses.

Business Case & Benefits

Carrying out this project addresses a critical problem that impacts costs, time and operational efficiency. Specifically, unnecessary expenses would be avoided and therefore profitability would be improved. In addition, by reducing delays, relations with airline clients would be improved, as trust with them would be improved. Additionally, by improving operational processes, the company would be positioned within the highest standards of excellence that it already has. Otherwise, the company will continue to assume unnecessary costs and lose standards. For this reason, the implementation of the project is aligned with the company's objectives.

Goal Statement

Decrease a 20% of the fines and delays within the processes of oversized cargo. This is proposed to be done by: may-2025

Timeline

<u>Phase</u>	<u>Planned Completion Date</u>	<u>Actual</u>
Define:	31-ene	24-ene
Measure:	17-ene	22-ene
Analyze:	31-ene	31-ene
Improve:	7-mar	10-mar
Control:	14-mar	

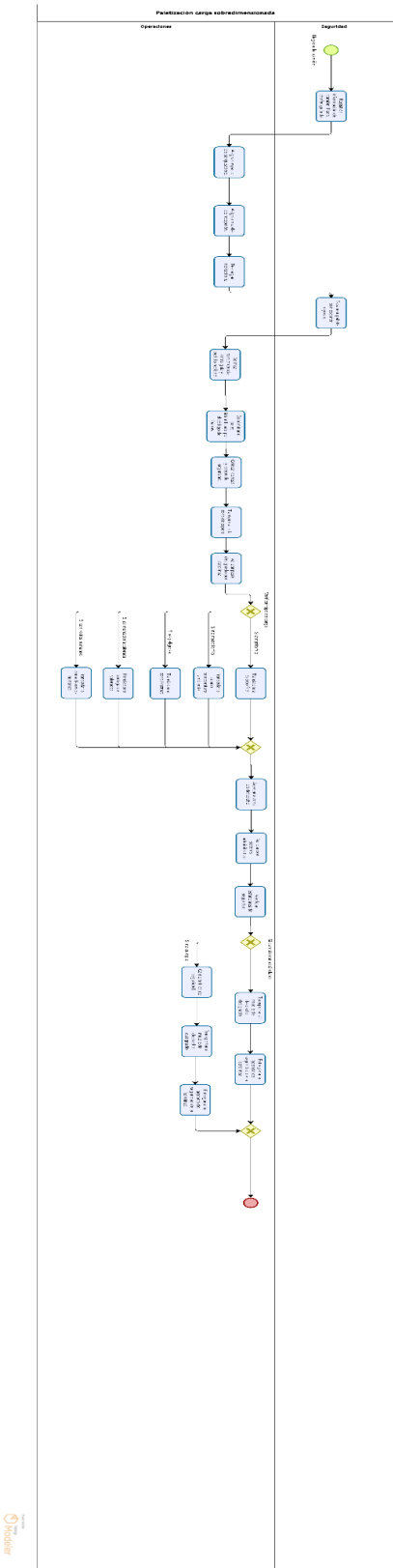
Scope - First/Last and In/Out

<u>1st Process Step</u>	Visit the company and get real data
<u>Last Process Step</u>	Implementing the first phases for a digital twin future
<u>In Scope:</u>	Oversized cargo
<u>Out of Scope:</u>	Standar cargo

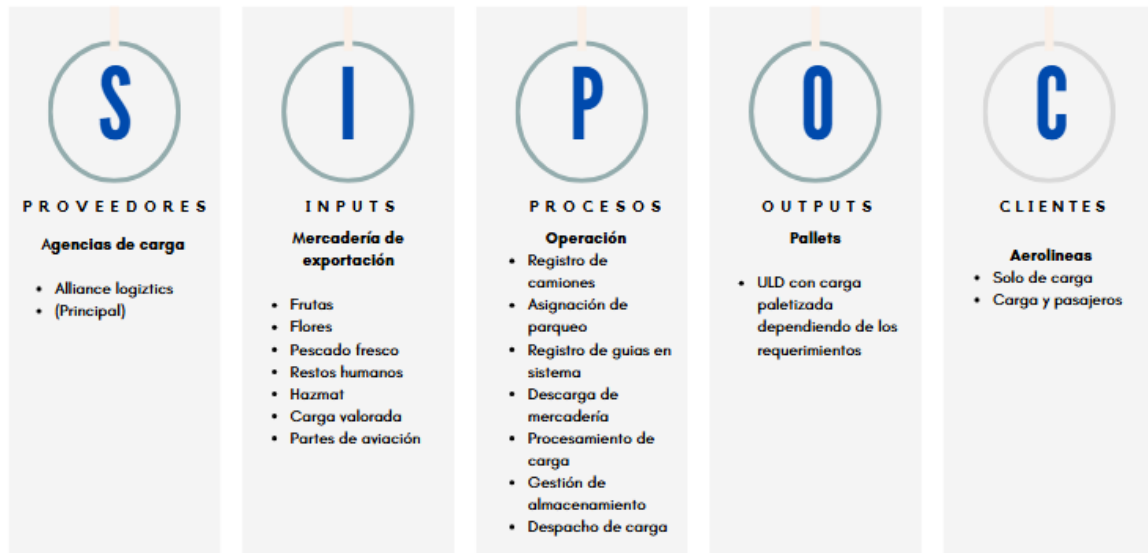
Team Members

<u>Position</u>	<u>Person</u>	<u>Title</u>	<u>% of Time</u>
Team Lead			
Sponsor			
Team Member	Ma.Isabel Dávila		90%
Team Member	Doménica Ordóñez		90%
Team Member	Leonardo Saltos		90%
Team Member			

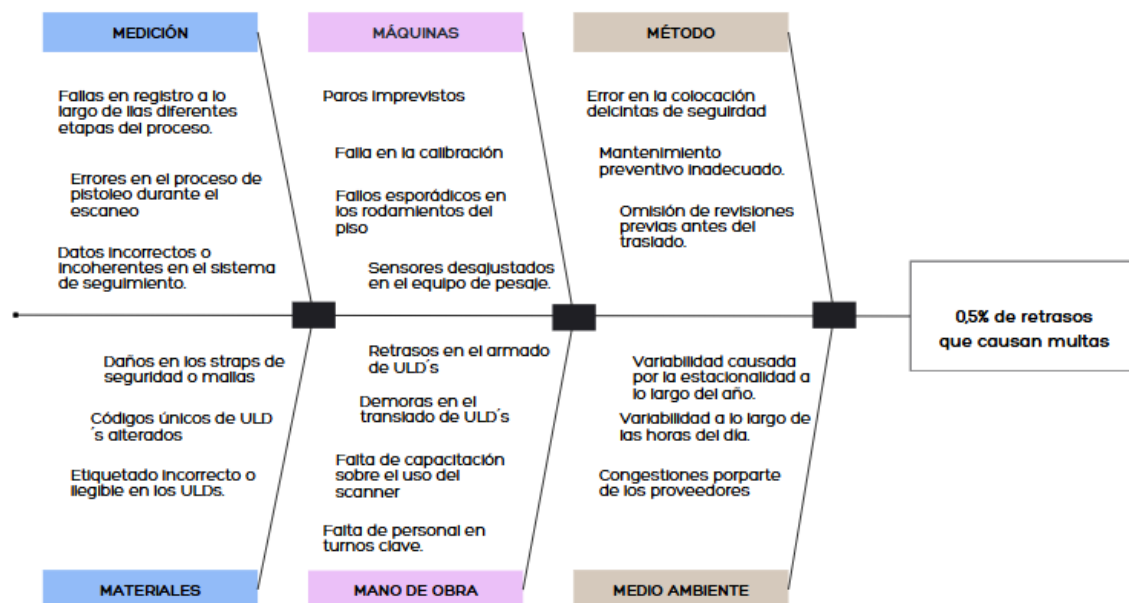
Apéndice 3



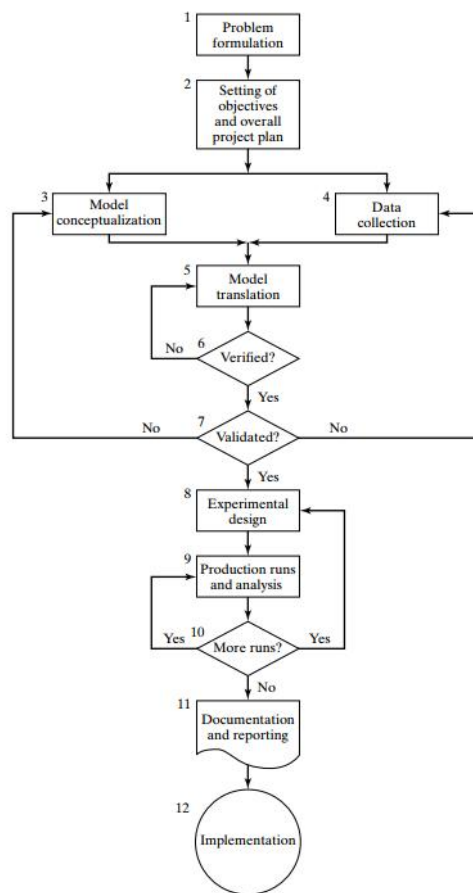
Apéndice 4



Apéndice 5



Apéndice 6



Apéndice 7

