

# ***Modelamiento de estrategias de gestión de inventarios de partes y repuestos:***

***Un enfoque mediante ecuaciones  
diferenciales***

**Colectivo de autores**

**2025**



ISBN: 978-9942-580-35-1



## CRÉDITOS

Modelamiento de estrategias de gestión de inventarios  
desarrolla partes y repuestos: un enfoque mediante ecuaciones  
diferenciales

## AUTORES

Autor 1: Margarita del Rocío Palma Samaniego

Filial: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Correo: [mdpalma3@espe.edu.ec](mailto:mdpalma3@espe.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4622-394X>

Autor 2: Flor Emperatriz Garcés Mancero

Filial: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Correo: [fegarces@espe.edu.ec](mailto:fegarces@espe.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3057-8268>

Autor 3: Kleber Adrián Pilco García

Filial: Universidad Estatal Península de Santa Elena

Correo: [kpilco1970@upse.edu.ec](mailto:kpilco1970@upse.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8151-7393>

Autor 4: Byrone Antonio Almeida Salazar

Filial: Universidad Estatal Milagro (UNEMI)

Correo: [balmeidas@unemi.edu.ec](mailto:balmeidas@unemi.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4412-1125>

Autor 5: Leopoldo Rafael Burgos Rea

Filial: Universidad de Guayaquil

Correo: [leopoldo.burgosr@ug.edu.ec](mailto:leopoldo.burgosr@ug.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5811-7586>

© ® Reservados todos los derechos de copia y Propiedad  
intelectual

2025

## **Editorial: Liveworking editorial**

No está permitida la reproducción total o parcial de su contenido ni su tratamiento por cualquier método por aquellas personas que no acrediten su relación con los autores.

Dirección y Coordinación Editorial: Sara Díaz Villacís

Revisión de contenido Christian Armendáriz PhD (c)

Revisión pedagógica: Fabrizzio Andrade PhD (c)

Diseño portada: *Sara Díaz V*

Libro bajo revisión técnica y didáctica de pares

Guayaquil - Ecuador

Septiembre del 2025

ISBN: 978-9942-580-35-1

### **Descarga:**

<https://liveworkingeditorial.com/product/978-9942-580-35-1>

### **Enlace del DOI:**

<https://doi.org/10.63792//978-9942-580-35-1>

## INDEXACIÓN



Google Play  
Books



Crossref

## **RESUMEN**

El presente estudio se desarrolló en la Base Aérea de Salinas, específicamente en el Escuadrón Mantenimiento Sistemas Aeronáuticos de la ESMA, con el objetivo de mejorar la gestión de inventarios de partes y repuestos aeronáuticos mediante el uso de modelos matemáticos basados en ecuaciones diferenciales. Esta investigación parte de la necesidad de optimizar la disponibilidad de repuestos críticos, reducir los costos de almacenamiento y evitar retrasos en el mantenimiento, situaciones que actualmente afectan la operatividad de las aeronaves. El problema identificado se centra en la falta de herramientas dinámicas que permitan gestionar eficientemente la rotación de inventarios, especialmente considerando la variabilidad de la demanda, los tiempos de reposición y los desafíos logísticos propios del sector aeronáutico. Ante esto, se propone el desarrollo de un modelo matemático que represente el comportamiento del inventario en función del tiempo y que integre elementos como el deterioro de materiales, la demanda estocástica y los tiempos de entrega. La metodología empleada en esta investigación fue de enfoque cuantitativo, con diseño no experimental, transversal y de tipo descriptivo. Se aplicó el Método Delphi para validar el modelo con expertos, se realizaron simulaciones numéricas de ecuaciones diferenciales ordinarias y fraccionarias, y se diseñaron escenarios de prueba para medir la eficiencia del modelo en condiciones

reales. Entre los hallazgos más relevantes, se destaca que la aplicación de modelos diferenciales permitió una predicción más precisa del comportamiento del inventario, reduciendo los costos operativos y mejorando los niveles de servicio. Además, el uso de ecuaciones fraccionarias con efecto de memoria mostró ventajas significativas para escenarios donde la demanda y el suministro se ven influenciados por eventos pasados. En conclusión, la implementación de estrategias matemáticas basadas en ecuaciones diferenciales mejora la eficiencia logística y la toma de decisiones, resultando clave para fortalecer la operatividad de la Base Aérea Salinas.

**Palabras clave:** Gestión de inventarios, Ecuaciones diferenciales, Mantenimiento aeronáutico, Modelos matemáticos, Optimización logística.

## ÍNDICE GENERAL

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| CRÉDITOS .....                     | ii  |
| AUTORES .....                      | ii  |
| ÍNDICE GENERAL.....                | vii |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....            | xii |
| ÍNDICE DE TABLAS .....             | xiv |
| INTRODUCCIÓN .....                 | 1   |
| CAPÍTULO I.....                    | 8   |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....   | 8   |
| 1.1. Objetivos .....               | 12  |
| 1.1.1. Objetivo General.....       | 12  |
| 1.1.2. Objetivos Específicos. .... | 12  |
| 1.2. Justificación.....            | 14  |
| 1.3. Ubicación del Estudio .....   | 17  |
| 1.4. Limitaciones del Estudio..... | 20  |
| CAPÍTULO II.....                   | 25  |
| MARCO TEÓRICO .....                | 25  |

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Antecedentes .....                                             | 25 |
| 2.1.1. Internacionales .....                                        | 28 |
| 2.1.2. Nacionales.....                                              | 32 |
| 2.1.3. Locales.....                                                 | 35 |
| 2.2. Marco Conceptual .....                                         | 38 |
| 2.2.1. Inventarios.....                                             | 38 |
| 2.2.2. Inventario de Repuestos de Mantenimiento<br>41               |    |
| 2.2.3. Tipos de Repuestos en el Inventario de<br>Mantenimiento..... | 44 |
| 2.2.4. Gestión de Inventarios.....                                  | 45 |
| 2.2.5. Estrategias de Gestión de Inventarios. ....                  | 47 |
| 2.2.6. Mantenimiento Aeronáutico y Gestión de<br>Repuestos .....    | 51 |
| 2.2.7. Modelos Matemáticos para la Gestión de<br>Inventarios.....   | 53 |
| 2.2.8. Ecuaciones Diferenciales en Modelos de<br>Inventarios.....   | 66 |
| 2.3. Marco Legal .....                                              | 81 |

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| 2.3.1. Normativas de Gestión de Inventarios ..... | 81  |
| 2.3.2. Normativas Nacionales.....                 | 83  |
| CAPÍTULO III .....                                | 85  |
| MARCO METODOLÓGICO .....                          | 85  |
| 3.1. Enfoque de la Investigación .....            | 85  |
| 3.2. Modalidad de la Investigación .....          | 85  |
| 3.3. Tipo de Investigación .....                  | 85  |
| 3.4. Población y Muestra.....                     | 87  |
| 3.4.1. Población.....                             | 87  |
| 3.4.2. Muestra. ....                              | 92  |
| 3.5. Operacionalización de las Variables.....     | 100 |
| 3.5.1. Variable Independiente.....                | 102 |
| 3.5.2. Variable Dependiente. ....                 | 102 |
| 3.6. Técnicas e Instrumentos .....                | 102 |
| 3.6.1. Técnicas de Investigación.....             | 102 |
| 3.6.2. Instrumentos de Investigación. ....        | 103 |
| 3.7. Plan de Recolección de Datos.....            | 105 |
| 3.7.1. Validación de los Datos. ....              | 108 |

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.8. Plan de Procesamiento de Información .....                           | 111 |
| 3.8.1. Modelo Matemático Propuesto para la<br>Gestión de Inventarios..... | 112 |
| 3.8.2. Formulación del Modelo Matemático .....                            | 113 |
| 3.8.3. Sistema de Ecuaciones Diferenciales del<br>Modelo Propuesto .....  | 117 |
| 3.8.4. Simulación de Inventario.....                                      | 120 |
| 3.8.5. Validación del Modelo mediante Método<br>Delphi.                   | 124 |
| CAPÍTULO IV .....                                                         | 129 |
| ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS .....                                  | 129 |
| 4.1. Análisis de los Resultados.....                                      | 129 |
| 4.1.1. Simulación Escenario 1 Demanda Constante.<br>                      | 131 |
| 4.1.2. Simulación Escenario 2 Horizonte Extendido<br>                     | 138 |
| 4.1.3. Simulación Escenario 3 Demanda Aleatoria<br>Realista. ....         | 146 |
| 4.1.4. Análisis Comparativo de los Escenarios de<br>Simulación.....       | 153 |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| Conclusiones y Recomendaciones ..... | 160 |
| 4.2. Conclusiones.....               | 160 |
| 4.3. Recomendaciones.....            | 162 |
| REFERENCIAS .....                    | 164 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 1:</b> Ubicación del área de estudio .....                          | 20  |
| <b>Figura 2:</b> Tipos de repuestos en el inventario de mantenimiento .....   | 44  |
| <b>Figura 3:</b> Estrategias de control de inventarios para Agrimroc S.A..... | 51  |
| <b>Figura 4:</b> Principales modelos de gestión de inventarios .....          | 56  |
| <b>Figura 5:</b> Representación gráfica del modelo (EOQ)..                    | 60  |
| <b>Figura 6:</b> Aeronave Diamond DA20C-1 .....                               | 88  |
| <b>Figura 7:</b> Aeronave Grob G120TP-A.....                                  | 89  |
| <b>Figura 8:</b> Distribución de ítems por clase ABC .....                    | 96  |
| <b>Figura 9:</b> Resultados Análisis ABC.....                                 | 99  |
| <b>Figura 10:</b> Resultados de Validación de datos .....                     | 109 |
| <b>Figura 11:</b> Código Python del modelo matemático en Escenario 1 .....    | 122 |
| <b>Figura 12:</b> Código Python del modelo matemático en Escenario 2.....     | 123 |
| <b>Figura 13:</b> Código Python del modelo matemático en Escenario 3.....     | 124 |

|                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 14:</b> Simulación del Inventario para un ítem ...                                 | 129 |
| <b>Figura 15:</b> Simulación de inventario con todos los ítems<br>.....                      | 131 |
| <b>Figura 16:</b> Simulación Escenario 1.....                                                | 133 |
| <b>Figura 17:</b> Resultados completos de la simulación del<br>Escenario 1 en Excel .....    | 134 |
| <b>Figura 18:</b> Resultados completos de la simulación de<br>inventario (Escenario 2) ..... | 138 |
| <b>Figura 19:</b> Resultados completos de la simulación del<br>Escenario 2 en Excel .....    | 139 |
| <b>Figura 20:</b> Resultados Simulación con Demanda<br>Aleatoria (Escenario 3).....          | 148 |
| <b>Figura 21:</b> Resultados completos de la simulación del<br>Escenario 3 en Excel .....    | 149 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabla 1:</b> Principales modelos matemáticos.....                                     | 65  |
| <b>Tabla 2:</b> Principales modelos matemático con ecuaciones diferenciales.....         | 80  |
| <b>Tabla 3:</b> Clasificación del inventario por tipo de proceso .....                   | 92  |
| <b>Tabla 4:</b> Resumen de clasificación ABC basado en la cantidad total consumida ..... | 95  |
| <b>Tabla 5:</b> Resultados Análisis ABC - Categoría A y B ..                             | 97  |
| <b>Tabla 6:</b> Información de la data .....                                             | 99  |
| <b>Tabla 7:</b> Operacionalización de variables .....                                    | 100 |
| <b>Tabla 8:</b> Registro y control de material de la bodega logístico ESMA.....          | 106 |
| <b>Tabla 9:</b> Resultados de validación estadística de datos .....                      | 110 |
| <b>Tabla 10:</b> Coeficiente de variación de datos .....                                 | 111 |
| <b>Tabla 11:</b> Resumen de criterios claves Escenario 1 .                               | 137 |
| <b>Tabla 12:</b> Resumen de criterios claves Escenario 2 .                               | 145 |
| <b>Tabla 13:</b> Resumen de criterios claves Escenario 3 .                               | 152 |
| <b>Tabla 14:</b> Escenario 1 Vs. Escenario 2.....                                        | 154 |

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabla 15:</b> Comparación resultados Escenario 1 Vs. Escenario 2..... | 154 |
| <b>Tabla 16:</b> Resumen Comparativo de Supuestos por Escenario.....     | 156 |
| <b>Tabla 17:</b> Análisis Comparativo de Escenarios de Simulación .....  | 158 |

## **INTRODUCCIÓN**

Dentro del sector aeronáutico ecuatoriano, la Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE) tiene su principal base operativa en la ciudad de Salinas, donde se encuentra emplazado el Escuadrón de Mantenimiento de Sistemas Aeronáuticos (ESMA). Esta unidad representa una infraestructura crítica para la defensa nacional, al ser responsable de ejecutar las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo sobre las aeronaves militares. Su misión cardinal es preservar la operatividad aérea mediante la ejecución rigurosa de inspecciones técnicas, intervenciones mecánicas y la sustitución de componentes, conforme a los estándares de seguridad aeronáutica y normativas internacionales vigentes. Para ello, el ESMA implementa un sistema logístico que permite la disponibilidad inmediata de las aeronaves mediante la adecuada administración del ciclo de vida de los repuestos, operado por el Centro de Almacenamiento de Material Aeronáutico. Esta gestión es clave para asegurar la disponibilidad

de partes críticas y mitigar interrupciones en las operaciones aéreas.

El mantenimiento aeronáutico, como elemento fundamental en la seguridad operacional, depende en gran medida de una gestión de inventarios precisa y eficiente, dado que la disponibilidad oportuna de repuestos permite evitar retrasos operativos y reducir las contingencias económicas derivadas de fallos inesperados (*Kinnison & Siddiqui, 2021*). La gestión de inventarios, desde un enfoque técnico, consiste en la administración óptima de los recursos materiales necesarios para el funcionamiento continuo de los sistemas organizacionales, buscando siempre la maximización de eficiencia al menor coste (*Montes, 2014*). Un control riguroso de inventarios se convierte en un instrumento decisional esencial, al permitir definir parámetros como niveles de stock, puntos de reorden y cantidades óptimas de aprovisionamiento, lo que incrementa la capacidad

de respuesta ante la demanda operacional (*Reina, 2024*).

En el contexto específico de la Escuela Superior Militar de Aviación “Cosme Rennella B.” (ESMA), se evidencian limitaciones estructurales en la infraestructura logística, así como una alta dependencia de proveedores externos, factores que impactan negativamente en los tiempos de entrega de repuestos. Estas restricciones provocan una gestión de inventarios con alta variabilidad e incertidumbre, lo que compromete la funcionalidad y seguridad de las aeronaves. La ausencia de una estrategia sistematizada en la gestión de inventarios no solo incrementa los costes operativos, sino que también prolonga los periodos de inactividad no programada.

La revisión de literatura especializada se vuelve indispensable para identificar y evaluar estrategias efectivas aplicadas en otros entornos operacionales, tanto a nivel internacional, nacional como local. En este sentido, Huanca & Rutti (2021) destacan que la

productividad en los almacenes presenta una correlación directa con la implementación de estrategias avanzadas de gestión de inventarios, demostrando, en su estudio, un incremento del 25% en productividad general y una mejora del 13,13% en el cumplimiento de despachos.

En el ámbito nacional, Reina (2024) desarrolla un modelo de gestión de inventarios para la empresa Transcomerinter S.A., enfocado en establecer parámetros óptimos de inventario como niveles de stock, puntos de reorden y cantidades a solicitar, orientado a la eficiencia de las operaciones de transporte y mantenimiento de flotas. El estudio revela deficiencias en los registros de piezas requeridas, generando discrepancias informativas que obstaculizan la toma de decisiones operativas. A través del diseño de un modelo estocástico y de almacenamiento por zonas, y la aplicación del Método ABC, se logró optimizar la disposición física del almacén y elevar la eficiencia operativa hasta un 95%.

A nivel local, Calle (2023) presenta un estudio aplicado a una empresa distribuidora de materiales en la provincia de Santa Elena, donde se evidencia que una gestión de inventarios deficiente conduce a pérdidas económicas significativas por acumulación de productos en estado no vendible. El autor resalta la necesidad imperante de implementar controles estrictos de inventario como medida preventiva.

La presente investigación tiene como propósito diseñar estrategias científicamente fundamentadas para la optimización de la gestión de inventarios de partes y repuestos aeronáuticos, mediante la formulación de modelos matemáticos apoyados en ecuaciones diferenciales, con el fin de minimizar costos y maximizar la disponibilidad operacional.

Este objetivo general se desglosa en cinco metas específicas:

- a) Sistematizar el marco teórico sobre estrategias de gestión de inventarios aplicadas al entorno aeronáutico, focalizando

en aquellas basadas en ecuaciones diferenciales.

- b) Diseñar escenarios simulados para validar empíricamente la aplicabilidad y efectividad de los modelos propuestos en la toma de decisiones.
- c) Construir un modelo matemático dinámico que describa las fluctuaciones de la demanda y el consumo de repuestos mediante ecuaciones diferenciales, permitiendo así optimizar su disponibilidad.
- d) Evaluar cuantitativamente el impacto de las estrategias implementadas a través del análisis de costos de almacenamiento, tasas de cumplimiento de demanda y niveles de inventario.
- e) Validar científicamente los modelos mediante el método Delphi, recopilando la opinión experta para asegurar su precisión y aplicabilidad en contextos reales de gestión.

La estructura metodológica de este trabajo se organiza en cuatro capítulos. El Capítulo I expone el planteamiento del problema, los objetivos y la justificación del estudio. El Capítulo II desarrolla el marco teórico, conceptual y legal, apoyado en fuentes bibliográficas relevantes. El Capítulo III describe la metodología investigativa, incluyendo el tipo de investigación, operacionalización de variables, técnicas e instrumentos utilizados. Finalmente, el Capítulo IV presenta los resultados empíricos, así como las conclusiones y recomendaciones derivadas de los hallazgos de la investigación.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La gestión eficiente de inventarios de partes y repuestos en el sector aeronáutico constituye un componente estratégico esencial para garantizar la continuidad operacional de las aeronaves. Una adecuada administración de estos recursos logísticos no solo asegura la disponibilidad permanente de componentes críticos, sino que también permite reducir significativamente los costos asociados a procesos de mantenimiento y a situaciones de desabastecimiento imprevisto. Esta investigación se desarrollará en la Base Aérea Salinas, específicamente en el Escuadrón de Mantenimiento de Sistemas Aeronáuticos (ESMA), localizada en la provincia de Santa Elena, cantón Salinas, donde se ha identificado como necesidad prioritaria la optimización de los ciclos de mantenimiento de las aeronaves. En el contexto actual, la gestión de inventarios presenta limitaciones estructurales derivadas de la ausencia de modelos matemáticos que incorporen la

naturaleza dinámica de la demanda y el consumo de partes, lo que propicia retrasos en los procesos de mantenimiento y compromete la disponibilidad operacional de los equipos aéreos.

En el ámbito global, los inventarios de partes y repuestos aeronáuticos enfrentan desafíos significativos derivados de la creciente complejidad de las cadenas de suministro internacionales, que requieren niveles de disponibilidad y precisión extremadamente altos. La industria de la aviación, en particular, demanda una respuesta logística resiliente ante disrupciones provocadas por eventos como desastres naturales, conflictos geopolíticos o pandemias, factores que han evidenciado la fragilidad de los sistemas tradicionales de almacenamiento y la urgencia de adoptar estrategias logísticas adaptativas y robustas (Chopra, 2014).

En respuesta a esta problemática, el presente estudio propone el desarrollo de estrategias de gestión de inventarios fundamentadas en modelos

matemáticos con ecuaciones diferenciales, aplicables al centro de almacenamiento de materiales aeronáuticos del ESMA en la Base Aérea Salinas. El objetivo es optimizar la eficiencia de rotación de los componentes utilizados en el mantenimiento y, con ello, mejorar el desempeño operativo general de las aeronaves.

A nivel nacional, el contexto ecuatoriano presenta limitaciones sustanciales en la gestión de inventarios de repuestos debido a una combinación de factores como la variabilidad de la demanda, ineficiencias en la cadena de suministro y una fuerte dependencia de la importación de piezas. Estas condiciones son especialmente críticas en el sector aeronáutico, donde la disponibilidad inmediata de componentes representa un requisito esencial para garantizar tanto la seguridad como la operatividad de las plataformas aéreas. La carencia de metodologías robustas en la gestión de inventarios puede derivar en sobre costos operativos y en tiempos prolongados de inactividad (Pérez, 2022).

Asimismo, la ausencia de mecanismos basados en pronósticos precisos de la demanda origina decisiones inadecuadas en cuanto a cantidades de pedido, promoviendo la obsolescencia de los productos almacenados y la pérdida de su valor comercial. En este contexto, se vuelve crucial la incorporación de estrategias de inventarios que integren análisis de rotación y herramientas predictivas, con el fin de mitigar tales ineficiencias y fortalecer la disponibilidad operacional de las aeronaves en la Base Aérea Salinas (Nuñez & Tarazona, 2024).

El uso de ecuaciones diferenciales como herramienta de modelación matemática en la gestión de inventarios permite representar de forma precisa la evolución temporal de los niveles de stock, posibilitando el diseño de estrategias de reabastecimiento en tiempo real. Esta capacidad de simulación dinámica conduce a una mayor eficiencia operativa, reducción de costos logísticos y mejora en la toma de decisiones (Guale, 2025).

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo General.**

Diseñar estrategias avanzadas de gestión de inventarios para partes y repuestos aeronáuticos, fundamentadas en modelos matemáticos basados en ecuaciones diferenciales, con el propósito de minimizar los costos logísticos totales y maximizar la disponibilidad operativa de los componentes críticos, garantizando así una respuesta eficiente y continua en los procesos de mantenimiento técnico.

### **1.1.2. Objetivos Específicos.**

- Desarrollar un marco teórico robusto sobre las estrategias contemporáneas de gestión de inventarios de partes y repuestos, con énfasis en aquellas que integran modelos matemáticos basados en ecuaciones diferenciales, a fin de identificar enfoques cuantitativos que modelen con precisión la dinámica del sistema logístico aeronáutico.
- Diseñar entornos de simulación aplicados a la gestión de inventarios, que permitan

evaluar empíricamente la eficacia operativa, la viabilidad práctica del modelo propuesto y su capacidad de mejorar los procesos decisionales en contextos de alta incertidumbre en la demanda y el suministro.

- Formular un modelo matemático fundamentado en ecuaciones diferenciales ordinarias, que represente con fidelidad el comportamiento dinámico de la demanda y el consumo de repuestos aeronáuticos, posibilitando la identificación de patrones de fluctuación y la optimización de decisiones de aprovisionamiento.
- Analizar cuantitativamente el impacto de las estrategias de gestión desarrolladas, a través de métricas clave como los costos totales de almacenamiento, niveles de disponibilidad del inventario y grado de cumplimiento de la demanda, con el fin de

determinar la eficiencia del sistema propuesto en entornos operativos reales.

- Validar el modelo matemático y las estrategias de inventario diseñadas utilizando el Método Delphi, mediante la recolección estructurada de juicios de expertos en logística aeronáutica y modelado matemático, con el propósito de garantizar su pertinencia práctica, aplicabilidad técnica y robustez conceptual en la gestión de inventarios.

## **1.2. Justificación**

La aplicación de modelos matemáticos basados en ecuaciones diferenciales en el ámbito de la gestión de inventarios constituye una herramienta analítica avanzada que permite representar con precisión la evolución dinámica de los niveles de stock en sistemas logísticos complejos (Bose et al., 2021). Esta metodología no solo permite comprender el comportamiento no lineal de la demanda y el suministro, sino que también habilita

mecanismos de optimización adaptativa y continua que inciden directamente en la eficiencia operativa y la reducción de costos logísticos (Gupta, 2021).

En el contexto específico de los servicios aeronáuticos, como es el caso del Escuadrón de Mantenimiento de Sistemas Aeronáuticos (ESMA) de la Base Aérea de Salinas, el uso de ecuaciones diferenciales en la modelación de inventarios representa un recurso estratégico fundamental. A través de este enfoque, es posible maximizar la disponibilidad de componentes críticos, minimizar los riesgos de desabastecimiento, y reducir significativamente los costos derivados de interrupciones logísticas (Kumar & Singh, 2020). Este tipo de modelamiento confiere mayor precisión a los procesos de toma de decisiones y fortalece la capacidad de respuesta de la cadena de suministro en tiempo real.

La metodología implementada implica la formulación de un modelo determinista mediante ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO), el cual

representa la variación temporal de los niveles de repuestos almacenados. Dichas ecuaciones se resuelven mediante métodos numéricos, permitiendo simular diversos escenarios de comportamiento logístico bajo condiciones variables de demanda y suministro (Kumar & Singh, 2020). Este enfoque facilita la toma de decisiones operativas sobre la marcha y permite implementar estrategias de reabastecimiento más eficientes.

Además, la modelación matemática de estrategias de inventario mediante ecuaciones diferenciales posibilita la reducción de costos financieros y operacionales al establecer niveles óptimos de stock, evitando tanto el exceso como la escasez de materiales. Ello conlleva una mejora significativa en la eficiencia económica global de la gestión de inventarios (Gupta & Gupta, 2020). Asimismo, este enfoque permite un control riguroso de los indicadores de desempeño logístico, reduciendo el desperdicio y aumentando la trazabilidad.

Desde una perspectiva normativa, el uso de ecuaciones diferenciales también contribuye a garantizar el cumplimiento de los estándares legales y técnicos aplicables a la industria aeronáutica. Mediante el mantenimiento de niveles adecuados de inventario de repuestos críticos, se minimiza el riesgo de incurrir en sanciones por incumplimiento de licitaciones o requisitos de operación establecidos por organismos regulatorios (Bose, Mishra, & Agrawal, 2021). Al mismo tiempo, este enfoque matemático refuerza el aseguramiento de la calidad del producto y el cumplimiento de las normativas de seguridad y mantenimiento (Gupta & Gupta, 2020).

### **1.3. Ubicación del Estudio**

La presente investigación se desarrollará en la Base Aérea ubicada en la ciudad de Salinas, provincia de Santa Elena, en la región litoral de la República del Ecuador. Esta instalación militar alberga al Escuadrón de Mantenimiento de Sistemas Aeronáuticos (ESMA), unidad

especializada que forma parte del componente logístico-operacional de la Escuela Superior Militar de Aviación "Cosme Rennella Barbatto" (ESMA). Geográficamente, Salinas se encuentra situada aproximadamente a los 2.2° de latitud sur y 80.95° de longitud oeste, configurando una ubicación estratégica en el perfil costero ecuatoriano. Dicha localización geográfica ofrece condiciones climáticas y topográficas óptimas para el desarrollo de actividades relacionadas con la instrucción, el entrenamiento de vuelo y el soporte logístico de operaciones aéreas.

La Base Aérea de Salinas constituye un nodo fundamental para la formación militar de los futuros oficiales de la aviación nacional. En este recinto opera la ESMA, una institución de educación superior militar adscrita a la Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE), encargada de la formación integral de cadetes en las áreas de pilotaje, mantenimiento técnico aeronáutico y doctrina militar. El proceso formativo tiene una duración de

cuatro años, al término del cual los egresados obtienen el grado de Subteniente, incorporándose formalmente a las filas de la Fuerza Aérea como oficiales.

Desde una perspectiva operativa, el Escuadrón de Mantenimiento de Sistemas Aeronáuticos desempeña un papel estratégico al fortalecer la infraestructura tecnológica y logística de la Base Aérea, proveyendo acceso a instalaciones especializadas, talleres de mantenimiento y recursos técnicos que soportan tanto la instrucción académica como las operaciones aéreas de la FAE. La presencia de esta unidad técnica garantiza no solo la disponibilidad operativa de las aeronaves de instrucción, sino también un entorno real de aprendizaje aplicado para los cadetes en formación.

En su calidad de unidad perteneciente a las Fuerzas Armadas del Ecuador, la ESMA cumple una función trascendental en el fortalecimiento de las capacidades nacionales de defensa. Su emplazamiento costero favorece un entorno

multidimensional de formación, integrando componentes marítimos y aéreos que enriquecen el perfil profesional de los oficiales. Asimismo, la ubicación geoestratégica de la Base Aérea facilita la interoperabilidad con otras unidades militares de la región, promoviendo sinergias institucionales orientadas a la defensa territorial, la cooperación interinstitucional y la proyección estratégica del poder aéreo del país. Ver Figura 1.



Figura 1: Ubicación del área de estudio

Fuente: (Google Maps, 2025)

#### **1.4. Limitaciones del Estudio**

En la Base Aérea de Salinas en el Escuadrón Mantenimiento Sistemas Aeronáuticos de la ESMA,

se encuentran tres bodegas de almacenamiento de partes y repuestos aeronáuticos, las mismas que se detallan a continuación.

#### Bodegas de almacenamiento de ESMA:

- Abastecimiento.
- Centro de almacenamiento de material aeronáutico.
- Herramientas.

Luego de la observación que se realizó in situ, en las bodegas mencionadas anteriormente se puede acotar que la bodega principal es la bodega de abastecimiento la cual cuenta con un área más amplia y es la encargada de la gestión del inventario general, mientras que una de menor tamaño es el centro de almacenamiento de material aeronáutico en donde se almacena el material consumible para los mantenimientos programados en las aeronaves. Siendo esta la que será considerada en este trabajo de investigación puesto que aquí se almacenan y controlan los materiales aeronáuticos. De esta manera este enfoque permitirá un análisis detallado

y focalizado en los procesos y las estrategias de gestión dentro del centro de almacenamiento de material aeronáutico.

En el contexto operativo del Escuadrón de Mantenimiento de Sistemas Aeronáuticos (ESMA), ubicado en la Base Aérea de Salinas, se dispone de una infraestructura logística compuesta por tres unidades de almacenamiento diferenciadas, destinadas al resguardo, clasificación y administración de partes y repuestos aeronáuticos esenciales para el mantenimiento de las aeronaves. Estas instalaciones se identifican como sigue:

- Bodega de Abastecimiento
- Centro de Almacenamiento de Material Aeronáutico
- Bodega de Herramientas

A partir de un proceso de observación directa in situ, se ha identificado que la Bodega de Abastecimiento constituye el nodo logístico principal, no solo por su mayor capacidad física, sino

también por su rol centralizado en la gestión integral del inventario general. En contraposición, el Centro de Almacenamiento de Material Aeronáutico, de dimensiones más reducidas, cumple una función especializada: alberga material aeronáutico consumible utilizado específicamente en los mantenimientos programados de aeronaves, siendo por tanto una unidad crítica en términos operativos.

Dado su carácter funcional y la naturaleza técnica de los insumos que administra, este centro ha sido seleccionado como objeto de estudio prioritario en la presente investigación. La elección responde a la necesidad de llevar a cabo un análisis focalizado y riguroso sobre las estrategias de gestión de inventarios, centrado en los procesos que regulan la disponibilidad, control y rotación del material aeronáutico almacenado en esta unidad.

Este enfoque permitirá una evaluación precisa de los procedimientos actuales, así como la formulación e implementación de modelos matemáticos orientados a la optimización dinámica

de inventarios, particularmente mediante el uso de ecuaciones diferenciales, en un entorno donde la disponibilidad de insumos impacta directamente la operatividad de las aeronaves y la eficiencia del mantenimiento técnico.

## **CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Antecedentes**

La gestión eficiente de inventarios de partes y repuestos constituye un componente estratégico esencial en sectores de alta criticidad como la industria aeronáutica, manufactura avanzada y sistemas logísticos integrados, en los cuales la disponibilidad oportuna de componentes es determinante para asegurar la continuidad operativa y optimizar los costos asociados. Una administración ineficiente de los inventarios puede conllevar dos escenarios contrapuestos, ambos perjudiciales: el exceso de existencias, que incrementa los costos por almacenamiento, obsolescencia y capital inmovilizado; o el desabastecimiento, que provoca interrupciones en los procesos productivos, tiempos de inactividad no programados y pérdidas económicas significativas por ineficiencia operativa.

Históricamente, los enfoques clásicos en la gestión de inventarios se han sustentado en

modelos determinísticos tales como el modelo de cantidad económica de pedido (EOQ) y el modelo de revisión periódica, ambos orientados a alcanzar niveles óptimos de existencias considerando variables como los costos de adquisición, almacenamiento y penalización por faltantes. No obstante, si bien estos modelos ofrecen soluciones adecuadas bajo condiciones estáticas y de demanda predecible, presentan limitaciones al enfrentarse a entornos dinámicos, inciertos o con múltiples restricciones operativas.

En el contexto de la presente investigación, se considera fundamental fortalecer el marco conceptual mediante la revisión de estudios científicos relevantes a nivel internacional, nacional y local, abordando tanto problemáticas asociadas a la gestión de inventarios como el desarrollo de modelos matemáticos de optimización, especialmente aquellos que incorporan ecuaciones diferenciales en su formulación. Esta revisión tiene como propósito enriquecer los fundamentos teóricos

y metodológicos del estudio, contribuyendo al diseño de un modelo de inventarios más preciso y adaptable al entorno real del sistema logístico aeronáutico.

Dentro del campo de la ingeniería de operaciones y la logística matemática, los modelos cuantitativos han evolucionado progresivamente para abordar desafíos como la variabilidad estocástica de la demanda, los costos variables de almacenamiento, la caducidad de productos y la eficiencia del reabastecimiento. En este contexto, la incorporación de ecuaciones diferenciales en el modelado dinámico ha ganado creciente aceptación. Esta técnica permite representar el comportamiento continuo y temporal de las variables del sistema, brindando una perspectiva integral para predecir, simular y optimizar decisiones de inventario en tiempo real, especialmente en sistemas donde la demanda, el consumo o el aprovisionamiento varían de forma continua con el tiempo.

### **2.1.1. Internacionales**

En el ámbito de la optimización logística, Nuñez y Tarazona (2024) desarrollaron una investigación titulada Gestión de inventarios de una compañía importadora de repuestos de transmisión de potencia de maquinaria pesada, en la cual se tomó como caso de estudio a una empresa dedicada a la importación de componentes desde China. El objetivo principal fue analizar la eficiencia de los modelos de gestión de inventarios aplicados, empleando una metodología de tipo aplicada, con diseño no experimental, enfoque cuantitativo y un alcance descriptivo. A lo largo del estudio se compararon escenarios determinísticos y estocásticos, contrastándolos con la situación real de la empresa, mediante la aplicación de modelos que incorporan el análisis de la demanda histórica y su pronóstico. Los resultados obtenidos demostraron que el modelo estocástico tipo (S, T) ofreció un desempeño superior en términos de rentabilidad frente al modelo actual y al determinístico, debido a su capacidad para

minimizar faltantes y mantener una distribución más estable del inventario.

Por otro lado, Villagra (2021) en su estudio Estrategias y mejoras operativas aplicadas a la gestión de inventarios y operaciones para obtener eficiencia operativa, propuso el desarrollo de una estrategia integral en la gestión de inventarios en el almacén de América Móvil S.A., con el objetivo de incrementar la eficiencia operacional y mantener elevados niveles de servicio al cliente. La metodología adoptada estuvo basada en la aplicación de un mapa estratégico, alineado a objetivos operativos. Como conclusión principal, se resalta que una gestión ordenada y precisa del almacenamiento permite mejorar la productividad general del sistema, reducir costos operativos y generar beneficios económicos tanto para la organización como para el cliente final.

En una línea más orientada al modelamiento formal, Ccoa y Alanoca (2017), en su trabajo Modelamiento matemático de sistemas dinámicos

económicos mediante ecuaciones en diferencias, se centraron en la formulación de modelos matemáticos para representar fenómenos económicos que evolucionan en tiempo discreto. Se abordaron modelos clásicos como el modelo de Samuelson, el modelo de inventarios de Metzler y el modelo de Telaraña, resolviéndose mediante técnicas analíticas y computacionales. Estos enfoques resultan particularmente relevantes para la presente investigación, debido a su conexión con los fundamentos del modelado de inventarios mediante ecuaciones diferenciales, en especial al incorporar dinámicas temporales que describen con precisión la evolución de los sistemas bajo estudio.

En el caso específico de Nuñez y Tarazona (2024), el análisis enfocado en la gestión de inventarios dentro de un contexto importador permite identificar diferencias metodológicas relevantes, ya que si bien su modelo considera escenarios estocásticos, la presente investigación propone un enfoque continuo y determinista

mediante el uso de ecuaciones diferenciales para modelar el comportamiento del inventario a lo largo del tiempo. No obstante, el modelo (S, T) puede ser útil como punto de referencia comparativo, permitiendo contrastar su rendimiento frente a los modelos continuos planteados en este estudio.

De igual forma, aunque el estudio de Villagra (2021) no incorpora modelamiento matemático explícito, su aporte estratégico resulta complementario al ofrecer evidencia práctica sobre la relación entre gestión de inventarios, eficiencia operativa y reducción de costos. Este componente es clave al momento de implementar cualquier modelo técnico, puesto que facilita su integración a la estructura organizacional de almacenamiento y suministro.

El trabajo de Ccoa y Alanoca (2017), por su parte, constituye una base teórica fundamental para el presente estudio, al ofrecer un enfoque técnico sobre la dinámica de inventarios en tiempo discreto, susceptible de ser extendido al dominio continuo

mediante ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO). Su propuesta metodológica, sustentada en la resolución computacional y analítica de sistemas, proporciona herramientas directamente aplicables a la formulación y validación del modelo propuesto en esta investigación.

Si bien los estudios revisados abordan distintas perspectivas—ya sea desde enfoques estocásticos, estratégicos u orientados al modelamiento discreto—todos contribuyen de manera complementaria a la presente propuesta. La diferenciación central de esta investigación reside en el uso de ecuaciones diferenciales para modelar de forma continua la evolución del inventario aeronáutico, lo que permite una representación más precisa del comportamiento dinámico del sistema, especialmente en entornos donde la variabilidad de la demanda y los tiempos de reposición exigen una formulación matemática adaptable y predictiva.

### **2.1.2. Nacionales**

En su estudio titulado *Modelo de gestión de inventarios en la empresa Cctz Locales ubicada en la Provincia del Guayas*, Andagana (2024) plantea como objetivo central el diseño de una propuesta metodológica para la optimización del proceso de inventarios, con el fin de minimizar los costos asociados al almacenamiento y maximizar el beneficio económico de la organización. La investigación adopta una metodología de enfoque mixto, combinando técnicas cuantitativas y cualitativas mediante la utilización de análisis documental, entrevistas estructuradas y la aplicación del Método ABC. Este último fue empleado como herramienta diagnóstica para clasificar los productos con base en su nivel de rotación y rentabilidad, permitiendo así focalizar los esfuerzos de gestión sobre aquellos ítems de mayor impacto económico.

La presente investigación guarda relación conceptual con el trabajo de Andagana (2024) al compartir el objetivo de optimizar la gestión de

inventarios mediante la reducción de costos operativos y el incremento de la eficiencia logística. No obstante, se distingue metodológicamente en su enfoque, ya que mientras el estudio de Andagana se fundamenta en un análisis cualitativo-cuantitativo tradicional con herramientas de clasificación de inventario, el presente trabajo propone una aproximación matemática y dinámica, basada en la formulación de modelos con ecuaciones diferenciales. Esta técnica permite representar de forma continua las variaciones en los niveles de inventario a lo largo del tiempo, capturando la interacción entre demanda variable, consumo, y políticas de reabastecimiento, con mayor precisión que los modelos de tipo estático.

Pese a las diferencias metodológicas, ambos enfoques pueden considerarse complementarios. El análisis de Andagana ofrece una visión operativa y categórica del comportamiento del inventario, mientras que la propuesta basada en ecuaciones diferenciales amplía el alcance analítico al

incorporar dinámicas temporales y permitir simulaciones bajo distintos escenarios de demanda. La posible integración de ambos modelos —uno basado en la clasificación estratégica de productos y otro en la modelación matemática del flujo de inventarios— podría fortalecer significativamente la capacidad de la organización para evaluar decisiones logísticas en términos de costos, eficiencia operativa y nivel de servicio.

En este sentido, la inclusión de herramientas de análisis como el Método ABC en la etapa diagnóstica, combinadas con la modelación de inventarios a través de sistemas de ecuaciones diferenciales, puede ofrecer una estructura metodológica robusta que oriente la toma de decisiones tanto a nivel táctico como estratégico en entornos logísticos complejos.

### **2.1.3. Locales**

En el estudio titulado Modelo de inventarios para la optimización de costos en la Empresa Aguas Peninsulares S.A., Cantón Salinas, Provincia de

Santa Elena, Guale (2025) plantea como objetivo principal la formulación de un modelo de inventario orientado a la reducción de costos operacionales en la empresa Aguas Peninsulares S.A., ubicada en la ciudad de Salinas, provincia de Santa Elena. La metodología adoptada incluyó un análisis bibliométrico del estado del arte, con el fin de identificar las mejores prácticas y herramientas existentes en la literatura científica. A partir de dicho análisis, se aplicó el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para seleccionar el modelo más adecuado, eligiéndose finalmente el Modelo de Cantidad Económica de Producción (EPQ) como herramienta base.

La investigación se sustentó en un enfoque cuantitativo, con diseño deductivo y descriptivo-correlacional, a través del cual se recopilaron y analizaron datos objetivos que permitieron evaluar el comportamiento del inventario y los niveles de producción. Como resultado, se evidenció que la implementación del modelo propuesto generó

mejoras significativas en la gestión del inventario, con impactos positivos en términos de optimización de costos y control del proceso productivo.

El enfoque planteado por Guale (2025) guarda relación con la presente investigación en tanto que ambos estudios comparten como eje central la optimización de la gestión de inventarios orientada a la minimización de costos. Sin embargo, existen diferencias sustanciales en el enfoque metodológico. Mientras que el autor utiliza herramientas clásicas como el modelo EPQ y la técnica AHP para priorización y toma de decisiones, la presente investigación propone un enfoque alternativo basado en la formulación matemática de modelos dinámicos mediante ecuaciones diferenciales.

Este enfoque permite representar de forma continua la evolución temporal del inventario, incorporando variables como el consumo, la demanda, y los tiempos de reabastecimiento, lo cual proporciona un marco más flexible y adaptable a

entornos donde las condiciones varían constantemente. Aunque metodológicamente distintos, ambos modelos pueden complementarse: el enfoque jerárquico de Guale puede ser utilizado como una etapa preliminar para la selección de parámetros clave o criterios de evaluación, mientras que el modelo con ecuaciones diferenciales se enfoca en la dinámica operativa y la optimización cuantitativa del sistema en tiempo real.

En conjunto, la comparación entre ambos enfoques enriquece el análisis al permitir evaluar cómo distintas herramientas metodológicas pueden ser integradas o contrastadas para mejorar la toma de decisiones en la gestión de inventarios, tanto en sectores industriales como en servicios estratégicos.

## **2.2. Marco Conceptual**

### **2.2.1. Inventarios**

Desde una perspectiva lexicográfica, la Real Academia Española (RAE, 2024) define el inventario como un registro exhaustivo y sistemático de los

bienes y activos pertenecientes a una persona natural o jurídica, estableciendo así una base estructural para la gestión y control del patrimonio organizacional.

En el contexto empresarial, Coalla (2024) amplía esta definición al conceptualizar el inventario como un proceso metodológico de verificación y control físico-contable de los activos materiales de una organización. Este proceso busca la conciliación entre los registros contables y la existencia real de los productos almacenados, permitiendo detectar discrepancias atribuibles a mermas, pérdidas operativas o errores administrativos, que puedan incidir negativamente en la veracidad de los estados financieros.

De forma complementaria, Sánchez et al. (2023), citando a Juca et al. (2019), sostienen que los inventarios deben ser considerados activos estratégicos, debido a su impacto directo en la eficiencia operativa, la productividad y los resultados financieros. El desempeño favorable o desfavorable

de estos activos está intrínsecamente vinculado a la eficacia con la que son gestionados, lo cual requiere no solo mecanismos de control físico, sino también la aplicación de políticas de gestión basadas en modelos cuantitativos y sistemas de apoyo a la toma de decisiones.

Desde un enfoque operativo, García y San Andrés (2021), tomando como referencia a Hidalgo (2017), definen el inventario como la cantidad física de materiales disponibles en los distintos eslabones del sistema de almacenamiento. Estos pueden clasificarse como materias primas, productos en proceso o productos terminados, según el nivel de transformación que hayan experimentado. Asimismo, se introduce el concepto de inventario agotado, entendido como la situación en la que la demanda supera la disponibilidad inmediata de stock, y donde los tiempos de reabastecimiento no permiten cubrir la carencia de forma oportuna, generando incumplimientos operacionales y afectaciones al nivel de servicio.

Cabe destacar que el inventario no debe asumirse como una categoría estática; por el contrario, puede clasificarse y gestionarse según distintos criterios, tales como el tipo de actividad empresarial, la naturaleza del producto, los volúmenes almacenados y las tasas de rotación. Estos factores influyen directamente en la elección de políticas de control y estrategias logísticas. En consecuencia, se vuelve indispensable establecer mecanismos de supervisión efectivos, particularmente en lo referente a la gestión de insumos críticos y materias primas, dado que una administración inadecuada puede derivar en pérdidas económicas significativas, interrupciones en la cadena de suministro, o incluso en riesgos operativos en sectores sensibles como el aeronáutico o manufacturero.

### **2.2.2. Inventario de Repuestos de Mantenimiento**

Según EasyMaint (2025), el inventario de repuestos orientado al mantenimiento industrial se define como el conjunto de insumos, piezas y

componentes almacenados por una organización con el propósito de dar respuesta a los requerimientos de mantenimiento preventivo y correctivo de sus activos físicos, incluyendo maquinaria, equipos técnicos, sistemas de producción y demás infraestructuras operativas. Este tipo de inventario puede comprender desde ítems de bajo valor unitario y alta rotación, como tornillos, sellos o rodamientos, hasta componentes críticos de elevado costo y complejidad tecnológica, tales como motores, bombas, módulos electrónicos o sistemas de control automatizado.

La gestión estratégica de estos inventarios implica asegurar una disponibilidad oportuna y suficiente de los repuestos requeridos, sin incurrir en excesos que generen sobrecostos por almacenamiento, obsolescencia, o capital inmovilizado. Asimismo, resulta fundamental evitar situaciones de desabastecimiento, ya que estas pueden generar interrupciones operativas que

afecten negativamente la productividad y la eficiencia del sistema productivo.

En consecuencia, una administración efectiva del inventario de mantenimiento debe procurar un balance óptimo entre nivel de servicio y costo logístico, lo cual implica la integración de herramientas de pronóstico de demanda, análisis de criticidad, clasificación de materiales (como el método ABC), y políticas de reabastecimiento alineadas a los ciclos de mantenimiento programados. Este equilibrio es esencial para garantizar la sostenibilidad técnica y económica de los procesos industriales, favoreciendo la continuidad operativa y el cumplimiento de los planes de mantenimiento establecidos.

### 2.2.3. Tipos de Repuestos en el Inventario de Mantenimiento.

EasyMaint (2025) menciona que los repuestos de mantenimiento pueden clasificarse de acuerdo con su criticidad y frecuencia de uso. Algunos tipos incluyen los que se muestran en la Figura 2:

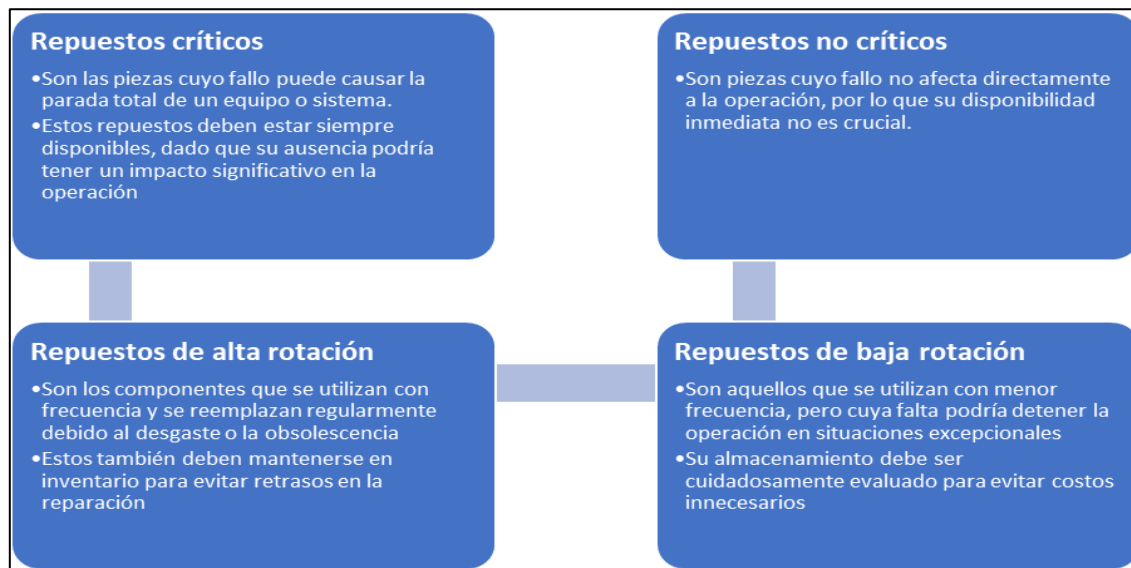


**Figura 2:** Tipos de repuestos en el inventario de mantenimiento

**Fuente:** (EasyMaint, 2025)

#### 2.2.4. Gestión de Inventarios.

De acuerdo con García y San Andrés (2021), quienes retoman los aportes de Noceda y Rivera (2018), los *inventarios* se conceptualizan como reservas estratégicas de recursos materiales —incluyendo materias primas, insumos auxiliares, productos en proceso de transformación y bienes terminados— que se ubican a lo largo de las diferentes etapas del sistema productivo y logístico de una organización. Estas acumulaciones constituyen un mecanismo esencial para asegurar la continuidad operativa y permitir una respuesta eficiente frente a las fluctuaciones de la demanda, tanto del entorno externo como de los procesos internos.

En cuanto al constructo de *gestión de inventarios*, Sánchez et al. (2023) lo abordan como un sistema operativo estructurado, concebido bajo una lógica de sistematización e integración funcional, cuyo propósito central es la optimización de costos globales, sin sacrificar la calidad del servicio ni la satisfacción del cliente final. Esta definición rebasa la visión tradicional centrada exclusivamente en el almacenamiento físico, al contemplar una serie de decisiones interdependientes que configuran una política integral de manejo de inventarios.

Desde un enfoque funcional, diversas corrientes teóricas coinciden en identificar componentes fundamentales para una gestión eficiente del inventario, entre los que se destacan:

- El análisis de la demanda, tanto retrospectivo como prospectivo, con el fin de modelar su comportamiento y reducir incertidumbre.
- La clasificación del inventario mediante técnicas como ABC (basada en valor) o XYZ (basada en variabilidad), que permiten priorizar la gestión según criticidad y rotación.
- La definición de políticas de control como puntos de reorden, niveles de inventario de seguridad o cantidades económicas de pedido (EOQ).
- La evaluación y selección de proveedores, considerando criterios de confiabilidad, tiempo de entrega y costos logísticos.
- La gestión del transporte y el almacenamiento, orientada a minimizar tiempos, daños y costos operacionales.
- Y la logística inversa, entendida como el conjunto de acciones destinadas a recuperar valor mediante la

reutilización, reciclaje o disposición técnica de los productos devueltos o no utilizados.

Desde una perspectiva aplicada, la gestión de inventarios se posiciona como un factor determinante para la eficiencia operativa y la rentabilidad, especialmente en sectores de alta intensidad de capital, como la industria manufacturera, logística o aeronáutica. En esta línea, Nuñez y Tarazona (2024) subrayan que una administración eficiente permite mitigar los riesgos tanto de ruptura de stock como de sobreabastecimiento, contribuyendo así a la optimización del capital de trabajo y a la resiliencia de la cadena de suministro.

Por su parte, Sánchez et al. (2023), alineándose con los planteamientos de Juca et al. (2019), refuerzan la importancia de implementar modelos cuantitativos de gestión, orientados a responder de manera precisa a las preguntas fundamentales de *cuándo* y *cuánto* reabastecer. Estos modelos incorporan técnicas de pronóstico estadístico, análisis de riesgos y simulación dinámica, y son clave para alcanzar niveles de inventario que garanticen disponibilidad operativa sin comprometer la liquidez de la empresa.

### **2.2.5. Estrategias de Gestión de Inventarios.**

A lo largo de la evolución teórica y práctica de la gestión de inventarios, diversos autores han planteado estrategias metodológicas orientadas a optimizar los sistemas de control de existencias en contextos organizacionales y logísticos. Uno de los aportes fundacionales en esta línea fue propuesto por E. W. Taft en el año 1918, a través de su artículo *The Most Economical Production Lot*, publicado en *The Iron Age*. En este trabajo seminal, Taft introdujo el Modelo de Lote Económico de Producción (EPQ, por sus siglas en inglés) como una ampliación del tradicional Modelo de Cantidad Económica de Pedido (EOQ). A diferencia del EOQ, que supone una adquisición instantánea de los lotes, el modelo EPQ incorpora la premisa de una tasa de producción finita y continua, permitiendo que la producción y el consumo de bienes ocurran simultáneamente. Este enfoque posibilita una representación más realista de los procesos de manufactura, especialmente en escenarios industriales donde la generación de productos y su utilización operativa son paralelas. El objetivo principal del modelo EPQ es determinar el tamaño óptimo del lote de producción que minimice el costo total, considerando tanto los costos de configuración como los costos de mantenimiento del inventario (Echeverría, 2007).

Décadas más tarde, Clark y Scarf (1960) realizaron contribuciones sustantivas al análisis de sistemas de inventarios en estructuras multinivel, abordando las complejidades asociadas a las jerarquías logísticas dentro de las cadenas de suministro. Su propuesta teórica sentó las bases para el diseño de políticas óptimas de aprovisionamiento descentralizado y coordinado, teniendo en cuenta factores tales como los lead times, la variabilidad estocástica de la demanda y los costos operativos inherentes a cada nodo de la red de distribución. Estos desarrollos resultaron fundamentales para conceptualizar sistemas de abastecimiento más resilientes y adaptables a entornos volátiles.

En la literatura más reciente, Borbor y López (2024) efectuaron una revisión sistemática de estrategias de gestión de inventarios en múltiples sectores empresariales, evidenciando una predominancia de enfoques tradicionales, tales como el Modelo EOQ y la clasificación ABC, en la implementación de políticas de stock. No obstante, los autores subrayan que si bien estos modelos promueven la eficiencia desde una perspectiva económico-estática, presentan limitaciones al omitir dimensiones dinámicas como la interacción interdepartamental y la fluidez comunicacional, aspectos que resultan determinantes para robustecer el control interno y la trazabilidad de existencias. En

ese sentido, se enfatiza la necesidad de integrar estos modelos con sistemas de información contable confiables y canales de comunicación institucional eficientes, que permitan la toma de decisiones oportuna y sustentada en datos verificados.

Adicionalmente, en un estudio aplicado a la empresa Agrimroc S.A., Borbor y López (2024) proponen una estrategia de segmentación jerárquica para el control de inventarios, inspirada en la estructura gerencial planteada por Koontz y Weihrich (2013). Esta metodología se basa en la descomposición funcional de la estrategia global de inventario en tres niveles de decisión —estratégico, táctico y operativo—, lo que facilita la personalización de políticas según las características específicas de cada unidad funcional dentro del sistema logístico. Esta aproximación representa una sinergia entre principios de administración clásica y técnicas contemporáneas de optimización, aportando mayor coherencia entre los objetivos organizacionales y las prácticas de control de inventarios.

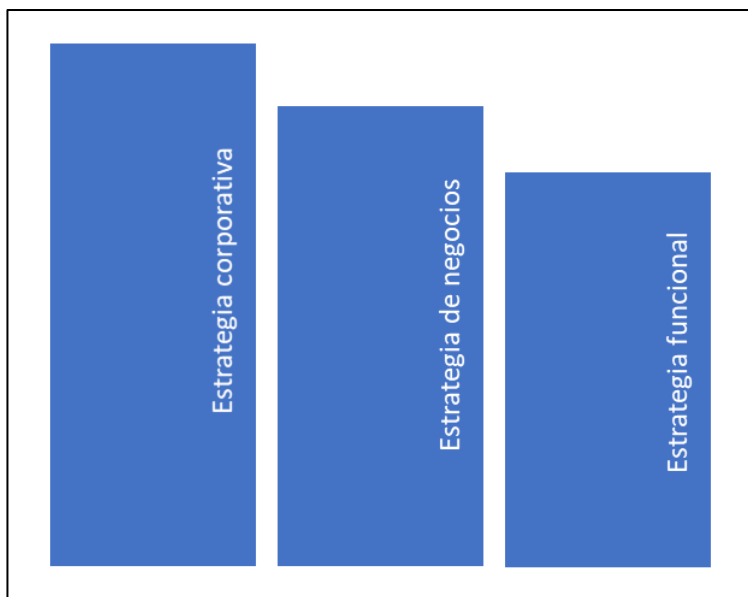


Figura 3: Estrategias de control de inventarios para Agrimroc S.A.

Fuente: (Borbor & López, 2024)

### **2.2.6. Mantenimiento Aeronáutico y Gestión de Repuestos**

El mantenimiento aeronáutico constituye una disciplina esencial dentro del sector de la aviación, al estar directamente vinculada con la seguridad operativa y la confiabilidad técnica de las aeronaves. Según lo establece TMAS (2022), dicho mantenimiento comprende un conjunto amplio de actividades ejecutadas por personal técnico altamente especializado, las cuales incluyen desde inspecciones programadas hasta

intervenciones correctivas, realizadas tanto en operaciones de línea como en instalaciones de hangar.

La naturaleza de estas actividades varía en función de múltiples factores, como la ubicación geográfica de la aeronave, las horas de vuelo acumuladas y el tipo de operación. Estas tareas son clasificadas en diferentes niveles de complejidad, abarcando desde revisiones rutinarias hasta procesos de overhaul o mantenimiento mayor, con el propósito de asegurar que las aeronaves cumplan con los estándares normativos y de rendimiento establecidos por los organismos de regulación aeronáutica.

En este contexto, la gestión eficiente del inventario de repuestos aeronáuticos se configura como un componente crítico del sistema de mantenimiento, ya que su efectividad incide directamente en la disponibilidad operativa de las unidades aéreas. Osorio y Escobar (2018) destacan que una administración adecuada del inventario debe contemplar el riesgo asociado a la variabilidad de la demanda y a las restricciones del suministro, mediante la implementación de estrategias de optimización que minimicen los costos operativos y eviten tiempos prolongados de inactividad técnica.

Un elemento adicional de vital importancia es la calidad y trazabilidad de los repuestos utilizados. En esta línea, RGS Engines (2025) enfatiza que la utilización de componentes certificados y validados por entidades aeronáuticas internacionales y fabricantes autorizados constituye una práctica imprescindible para garantizar la integridad del sistema aeronáutico. La verificación de certificaciones de aeronavegabilidad, trazabilidad documental y sellos de aprobación es fundamental para asegurar que los repuestos cumplen con los requerimientos técnicos exigidos y contribuyen a mantener los niveles de seguridad operacional.

### **2.2.7. Modelos Matemáticos para la Gestión de Inventarios.**

Los modelos matemáticos aplicados a la gestión de inventarios constituyen herramientas analíticas fundamentales que permiten a las organizaciones optimizar la disponibilidad de productos al tiempo que minimizan los costos operativos vinculados al almacenamiento y aprovisionamiento. Tal como señalan Oliveira et al. (2018), la utilización de técnicas cuantitativas, estadísticas y matemáticas en la administración de inventarios es esencial para evitar incrementos innecesarios en los costos del producto final y prevenir interrupciones en la continuidad de la cadena de suministro.

Estos modelos permiten determinar con precisión variables críticas como el tamaño óptimo de los lotes de pedido, la frecuencia adecuada de reabastecimiento, y el momento ideal para ejecutar órdenes de compra, con el objetivo de alcanzar el mínimo costo total asociado a la tenencia de inventario. Entre los modelos clásicos más difundidos se encuentra el Modelo de Cantidad Económica de Pedido (EOQ), el cual calcula el volumen óptimo de pedido a partir del equilibrio entre los costos de adquisición y los costos de mantenimiento del inventario. Asimismo, el modelo (Q, R) representa un enfoque más dinámico, definiendo políticas de reorden que se activan cuando el nivel de inventario alcanza un umbral específico (R), considerando la demanda proyectada y el tiempo de reposición, mientras que Q corresponde a la cantidad solicitada por pedido.

En función del grado de certeza con el que se conocen las variables del sistema, los modelos matemáticos de inventarios pueden clasificarse en dos grandes categorías:

- Modelos deterministas, en los que la demanda, los tiempos de entrega y los costos son conocidos y constantes.

- Modelos probabilísticos (o estocásticos), que introducen incertidumbre y variabilidad en al menos una de estas variables, reflejando así situaciones más realistas en entornos dinámicos o con fluctuaciones de mercado.

El uso adecuado de estas estructuras matemáticas permite a las empresas tomar decisiones estratégicas basadas en datos, mejorar la eficiencia operativa y garantizar la sostenibilidad logística en el mediano y largo plazo.

#### **2.2.7.1. Modelo Determinista**

En este tipo de modelo la demanda es constante y conocida en el tiempo, ya que se conoce en todo momento el tipo de demanda que exigen los clientes. Se utilizan en contextos en los que la demanda es constante y prevista. Este modelo a la hora de realizar un pedido es muy fiable y rápido, puesto que se tiene constancia de la disponibilidad de dichas existencias por medio de su demanda; la única variable a saber es la que relaciona la cantidad de pedido, para lo cual se utiliza el lote económico del pedido (Meana, 2024).

#### **2.2.7.2. Modelo Probabilístico**

Estos modelos se aplican cuando existen incertidumbres en la demanda y otros factores, y se detallan a través de distribuciones

probabilísticas. Son útiles en contextos donde la demanda es fluctuante e incierto (Mecalux, 2023).

Los principales modelos de gestión de inventarios según la certeza o incertidumbre se detallan a continuación. Ver Figura 4:

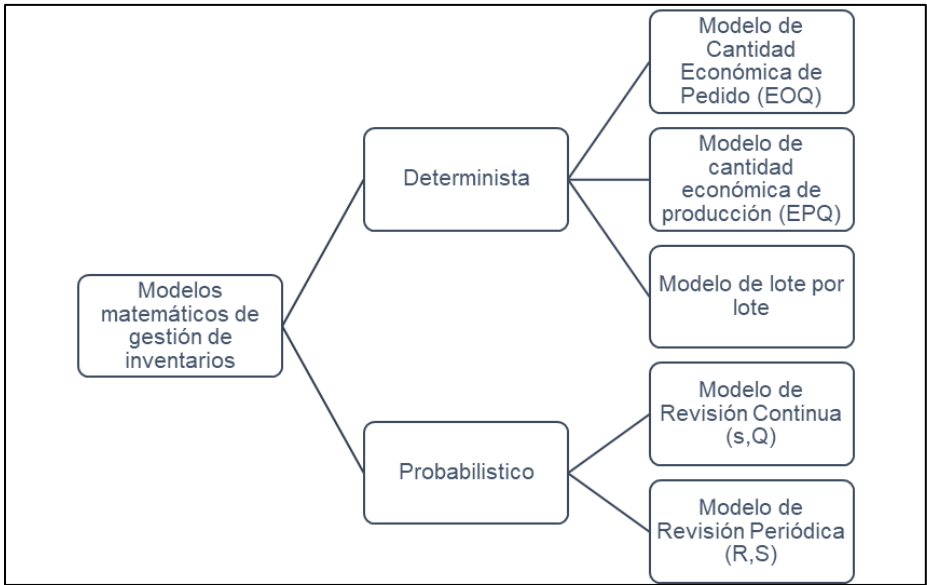


**Figura 4:** Principales modelos de gestión de inventarios

**Fuente:** (Betancourt D. , 2017)

**2.2.7.3. Características de los Principales Modelos de Inventario**

Como se observa en la Figura 4 existen varios modelos de inventario, cada uno ideado para tratar distintas circunstancias y

contextos de negocio. A continuación, se detallan los atributos de los modelos más habituales:

#### **2.2.7.4. Modelo de Cantidad Económica de Pedido EOQ**

El Modelo de Cantidad Económica de Pedido (EOQ, por sus siglas en inglés: *Economic Order Quantity*) constituye una de las formulaciones más fundamentales en la teoría de la administración de inventarios. Esta herramienta de optimización clásica permite determinar el volumen de pedido óptimo que una organización debe solicitar en cada ciclo de reaprovisionamiento, de manera que se minimicen los costos totales de inventario asociados tanto al aprovisionamiento como al almacenamiento (Mecalux, 2023).

Desarrollado inicialmente por F. W. Harris y posteriormente formalizado por R. H. Wilson, el modelo —también conocido como Modelo de Harris-Wilson— busca establecer un punto de equilibrio entre los costos fijos de colocación de pedidos (es decir, los costos administrativos y logísticos asociados a cada orden de compra) y los costos variables de posesión o mantenimiento del inventario, tales como seguros, deterioro, obsolescencia, y costos de oportunidad del capital inmovilizado.

De acuerdo con Mecalux (2023), el modelo EOQ se basa en una serie de supuestos teóricos fundamentales que garantizan la validez de su formulación analítica, entre los cuales se destacan:

- Demanda constante y conocida durante el horizonte de planificación,
- Costos fijos por pedido y costos proporcionales al inventario promedio almacenado,
- Ausencia de descuentos por volumen de compra (precio unitario constante),
- Disponibilidad total del inventario, es decir, no se contemplan faltantes ni quiebres de stock,
- Tiempo de reposición conocido y constante, lo que implica una sincronización perfecta entre pedido y recepción.

Bajo estas condiciones ideales, el modelo permite calcular el tamaño óptimo del lote de pedido ( $Q^*$ ), mediante una expresión matemática que busca minimizar el costo total anual del sistema de inventario, entendido como la suma de los costos de pedido y de mantenimiento.

La fórmula clásica del EOQ se define como:

$$EOQ = \sqrt{\frac{2 \times D \times S}{H}} \quad (1)$$

Donde:

**Q:** Cantidad óptima de pedido

**D:** Demanda anual del producto

**S:** Costo de realizar cada pedido

**H:** Costo de almacenamiento de un producto durante un tiempo determinado.

En la Figura 5 se muestra que cuando se está terminando el inventario de productos, es decir, cuando los productos alcanzan el límite del punto de pedido, el sistema emite de manera automática el pedido. Esa cantidad de unidades es la cantidad económico de pedido (Meana, 2024).

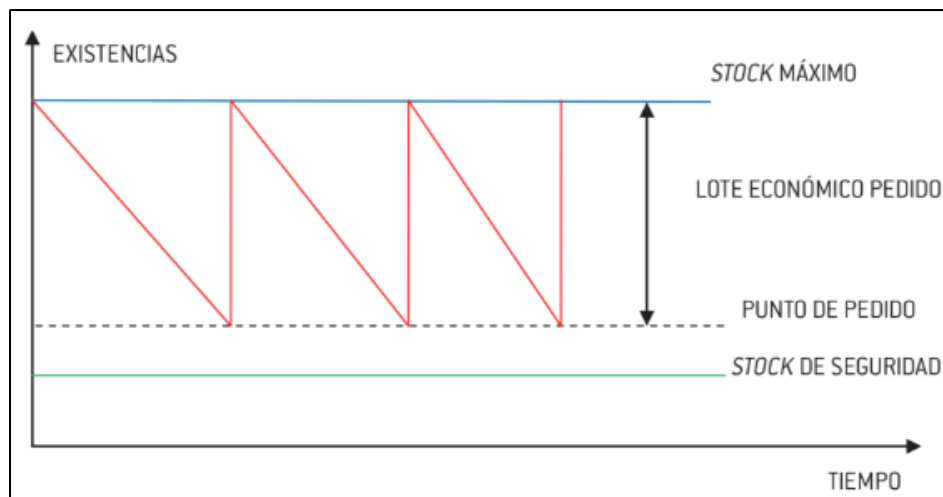


**Figura 5:** Representación gráfica del modelo de cantidad económica de pedido (EOQ)

**Fuente:** (Meana, 2024)

Según Betancourt (2017), el Modelo de Cantidad Económica de Pedido (EOQ) no solo representó un avance significativo en la gestión cuantitativa de inventarios, sino que también sirvió como base estructural para el desarrollo de múltiples extensiones del modelo clásico. Estas versiones derivadas fueron diseñadas para adaptarse a contextos logísticos más complejos y realistas, incorporando variables adicionales que afectan las decisiones de aprovisionamiento.

Entre las variantes más reconocidas se encuentra el Modelo EOQ con descuentos por cantidad, el cual introduce la posibilidad de obtener reducciones en el costo unitario de adquisición a medida que aumenta el volumen de compra. Esta versión permite evaluar si las economías de escala derivadas del descuento compensan los costos incrementales de almacenamiento, lo que conlleva a un nuevo criterio de optimización basado en la comparación entre el costo total con y sin descuentos.

Otra adaptación relevante es el Modelo EOQ con faltantes planificados, el cual contempla escenarios en los que no toda la demanda será satisfecha de manera inmediata, permitiendo ciertos niveles de desabastecimiento intencional o controlado durante un periodo específico. Este modelo se justifica en contextos donde los costos de mantener inventario son considerablemente altos y la penalización por escasez es tolerable o se puede diferir. Así, se equilibra el costo de mantenimiento con el costo asociado a los faltantes, optimizando el punto de pedido y la cantidad solicitada bajo dichas condiciones.

También existen variantes que contemplan múltiples ítems con restricciones de espacio de almacenamiento, donde se aplica el

modelo EOQ simultáneamente a varios productos sujetos a una limitación física del almacén o a un presupuesto conjunto, empleando técnicas de programación matemática para optimizar el uso de recursos compartidos.

Estas extensiones reflejan la versatilidad y aplicabilidad del modelo EOQ en diferentes entornos logísticos, constituyendo herramientas avanzadas para la toma de decisiones en sistemas de inventario con restricciones reales.

#### **2.2.7.5. Cantidad Económica de Pedido en Producción POQ**

Teniendo en cuenta que el pedido puede ser recibido en un periodo de tiempo determinado, este modelo considera tanto la tasa de demanda como la tasa de producción. La fórmula del Modelo POQ es la siguiente:

$$EPQ = \sqrt{\frac{2DS}{H} \times \frac{P}{P-d}} \quad (2)$$

Donde:

**P:** tasa de producción.

**d:** Tasa de demanda.

#### **2.2.7.6. Lote por Lote**

El objetivo fundamental en la gestión eficiente de inventarios es adquirir únicamente la cantidad estrictamente necesaria, lo que permite mantener un nivel de stock óptimo, evitando tanto excesos como faltantes, y reduciendo en consecuencia los costos de mantenimiento y almacenamiento asociados.

Si bien el Modelo de Cantidad Económica de Pedido (EOQ) representa una herramienta cuantitativa valiosa para la determinación del volumen ideal de pedido, su efectividad depende de su integración con otras estrategias de gestión de inventarios. En la práctica, el entorno logístico suele estar condicionado por múltiples variables dinámicas, tales como la fluctuación en la demanda, variaciones en los plazos de entrega y políticas comerciales asociadas a descuentos por volumen.

Por tanto, el modelo EOQ no debe aplicarse de forma aislada ni bajo una lógica rígida. Es esencial considerar la naturaleza cambiante del entorno operativo, lo cual puede requerir ajustes periódicos en las cantidades de pedido y en los parámetros del modelo, para reflejar adecuadamente las condiciones actuales del mercado, la cadena de suministro y las capacidades internas de la organización. (Mecalux, 2023). Matemáticamente, el modelo se representa como:

$$Q_t = D_t \quad (3)$$

Donde:

$Q_t$  : Cantidad pedida en el período.

$D_t$  : Demanda en el período t.

Este modelo se aplica extensamente en los sistemas de Justo a Tiempo (JIT) y en la producción a pedido. Su mayor beneficio es la disminución de los gastos de almacenaje, aunque puede conllevar incrementos en los costos de pedido y una dependencia incrementada de proveedores de confianza Betancourt (2017).

#### **2.2.7.7. Modelo de Revisión Continua Q R**

Betancourt (2017) menciona que con el Modelo (Q, R) se efectúa un pedido de tamaño Q cuando el nivel de inventario se reduce a un punto de reorden R, teniendo en cuenta las fluctuaciones en la demanda y el plazo de entrega. La fórmula del Modelo (Q,R) es la siguiente:

$$R = dL + SS \quad (4)$$

Donde:

d = Demanda promedio por período.

L= Plazo de entrega.

SS = Stock de seguridad.

**2.2.7.8. Modelo de Revisión Periódica R S**

Betancourt (2017) menciona que se realiza una revisión del inventario en periodos regulares R y se efectúa un pedido para incrementar el nivel de inventario a un nivel objetivo S, considerando la incertidumbre en la demanda durante el período de revisión y el plazo de entrega. La fórmula del modelo (R, S) es la siguiente:

$$Q = S - I \tag{5}$$

Donde:

S: Nivel objetivo de inventario.

I: Inventario disponible en el momento de la revisión.

**2.2.7.9. Resumen de los Principales Modelos Matemáticos de Inventarios.**

La Tabla 1 resume los principales modelos matemáticos:

**Tabla 1:** Principales modelos matemáticos

| Tipo de Modelo | Modelo | Definición (objetivo) | Referencia bibliográfica |
|----------------|--------|-----------------------|--------------------------|
|----------------|--------|-----------------------|--------------------------|

|                |                                                  |                                                                                                                                                                             |                    |
|----------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Determinista   | Modelo de cantidad económica de pedido (EOQ)     | Es un método empleado para establecer el número ideal de productos que una compañía debe adquirir cada vez que realiza un pedido al proveedor                               | (Mecalux, 2023)    |
|                | Cantidad económica de pedido en producción (POQ) | Este modelo considera tanto la tasa de demanda como la tasa de producción                                                                                                   | (Betancourt, 2017) |
| Probabilístico | Lote por lote                                    | Consiste en obtener justamente lo que necesito, lo que conlleva a tener el inventario exacto requerido y con él un bajo costo de mantenimiento                              | (Mecalux, 2023)    |
|                | Modelo de Revisión Continua (Q,R)                | Se efectúa un pedido de tamaño Q cuando el nivel de inventario se reduce a un punto de reorden R, teniendo en cuenta las fluctuaciones en la demanda y el plazo de entrega. | (Betancourt, 2017) |
|                | Modelo de Revisión Periódica (R,S)               | Se realiza una revisión del inventario en periodos regulares R y se efectúa un pedido para incrementar el nivel de inventario a un nivel objetivo S                         | (Betancourt, 2017) |

**Elaborado por: Autores**

## **2.2.8. Ecuaciones Diferenciales en Modelos de Inventarios**

Las ecuaciones diferenciales constituyen herramientas fundamentales dentro del análisis matemático aplicado, especialmente en el modelado de sistemas dinámicos. Su utilidad se extiende a diversos campos, entre ellos, la gestión de inventarios, en la que permiten describir con precisión la evolución temporal de los niveles de existencias bajo condiciones variables (Zill, 2014).

Según Zill (2014), una ecuación diferencial se define como una expresión matemática que relaciona una función desconocida con una o más de sus derivadas, permitiendo describir cómo dicha función cambia en función de una variable independiente, comúnmente el tiempo. En el contexto de inventarios, estas ecuaciones permiten representar la dinámica de entrada y salida de productos, modelando procesos de consumo, reposición, producción o demanda, y facilitando la formulación de soluciones que optimicen la gestión de recursos logísticos.

Aplicadas a la gestión de inventarios, las ecuaciones diferenciales posibilitan el estudio de cómo se modifica el nivel de inventario en función del tiempo, considerando factores como la tasa de demanda, los tiempos de reabastecimiento y las condiciones de producción. Este enfoque matemático dinámico

permite una representación más realista de los sistemas logísticos frente a modelos estáticos tradicionales, adaptándose a escenarios de variabilidad en la demanda y a políticas de reorden dinámicas. A continuación, se presentan algunas representaciones matemáticas típicas que emplean ecuaciones diferenciales como base para describir el comportamiento del inventario en el tiempo, bajo diferentes condiciones operativas y supuestos logísticos.

#### ***2.2.7.10. Modelo EOQ con Memoria mediante Derivadas Fraccionarias***

Según Pakhira et al. (2019), el modelo clásico de Cantidad Económica de Pedido (EOQ) se ha construido históricamente sobre la base de ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) que modelan la dinámica del inventario asumiendo que los cambios en los niveles de existencias dependen exclusivamente del estado actual del sistema, es decir, del tiempo presente y de variables como la tasa de demanda y los parámetros de reposición. Sin embargo, este enfoque tradicional omite los efectos de memoria, una limitación significativa en entornos donde las decisiones actuales están influenciadas por el comportamiento histórico del sistema.

En este contexto, los autores introducen el concepto de memoria matemática mediante el uso de ecuaciones diferenciales fraccionarias, las cuales permiten incorporar el historial previo del sistema como parte activa en su evolución dinámica. Este enfoque reconoce que el estado actual de un sistema no solo está condicionado por sus condiciones iniciales y parámetros vigentes, sino también por su trayectoria temporal pasada, capturando con mayor fidelidad la complejidad de los sistemas reales de inventario.

Pakhira et al. (2019) desarrollaron un modelo EOQ basado en derivadas fraccionarias, incorporando una tasa de demanda constante y un orden fraccionario en la formulación de las ecuaciones, con el fin de reflejar el impacto de las fluctuaciones pasadas en la demanda y los retrasos en la reposición sobre las decisiones presentes de reabastecimiento. Esta extensión permite analizar cómo el efecto de memoria altera las políticas óptimas de pedido, resultando especialmente útil en entornos donde las condiciones logísticas son sensibles al historial de operación del sistema.

Este tipo de modelado es particularmente relevante para la gestión de inventarios en el sector aeronáutico, donde la

disponibilidad de repuestos, los ciclos de mantenimiento y la programación de sustituciones están profundamente influenciados por eventos pasados. Por ejemplo, los pedidos no cumplidos, las demandas acumuladas no atendidas, o la naturaleza perecedera de ciertos insumos técnicos —cuyo deterioro depende del tiempo de almacenamiento— son todos fenómenos que se ajustan mejor a un enfoque de modelación fraccionaria, en comparación con modelos tradicionales sin memoria.

En este sentido, los modelos fraccionarios propuestos por Pakhira, Ghosh, Sarkar y Narayan (2019) representan un avance significativo en el estudio de sistemas de inventarios complejos, ya que permiten capturar comportamientos no locales y dependientes del tiempo pasado, lo cual es clave para mejorar la precisión predictiva y la robustez de las políticas de reabastecimiento en contextos operativos de alta incertidumbre y variabilidad temporal.

La fórmula del modelo de cantidad Económica de Pedido (EOQ) con efecto de memoria es la siguiente.

$$\frac{d^\alpha I(t)}{dt^\alpha} = -D \quad (6)$$

Donde:

$\frac{d^\alpha I(t)}{dt^\alpha}$  representa la derivada fraccionaria de orden  $\alpha$  del nivel de inventario  $I(t)$ .

$D$  es la tasa de demanda constante.

#### **2.2.7.11. Modelo de Inventario con Demanda Dependiente del Tiempo**

En escenarios donde la demanda cambia a lo largo del tiempo, se puede modelar el nivel de inventario  $I(t)$  a través de la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dI(t)}{dt} = -D(t) \quad (7)$$

Donde:

$D(t)$  es una función que representa la demanda en función del tiempo.

Para modelar las estrategias de gestión de inventarios con ecuaciones diferenciales, es necesario reflejar dinámicamente cómo con el tiempo la existencia de piezas de repuesto cambia con el tiempo, dependiendo de varios factores.

#### **2.2.7.12. Modelo de Deterioro y Demanda Estocástica**

En su estudio titulado *Diseño de un modelo de inventario EPQ, considerando un sistema de producción imperfecto con demanda estocástica y dependiente de los esfuerzos de ventas en esquemas colaborativos*, Mora Arquez (2018) plantea una extensión del modelo clásico de Cantidad Económica de Producción (EPQ), integrando múltiples elementos de la realidad industrial. El autor propone un enfoque colaborativo en una cadena de suministro de dos niveles, conformada por un fabricante y múltiples minoristas, en la cual ambos actores coordinan decisiones de producción y comercialización con el objetivo de maximizar beneficios conjuntos.

Dentro de esta formulación, la demanda del mercado es estocástica y sigue una distribución exponencial, dependiente del nivel de esfuerzo publicitario o actividades de promoción, lo cual

introduce un componente dinámico vinculado a la inversión en ventas. Asimismo, el sistema de producción no es perfecto: se considera la existencia de defectos de fabricación y un proceso de inspección y eliminación de unidades no conformes, lo que añade realismo al modelo y lo adapta a escenarios con variabilidad en la calidad de producción.

En el contexto de la gestión de inventarios con deterioro y demanda estocástica, especialmente aplicada a repuestos técnicos, es fundamental incorporar el hecho de que estos ítems pueden perder valor o funcionalidad con el tiempo, ya sea por uso operativo, fallas estructurales o vencimiento. Bajo estas condiciones, la demanda no es determinista, sino que puede modelarse como un proceso aleatorio que captura la incertidumbre inherente a los requerimientos reales del sistema.

Una manera efectiva de representar este comportamiento dinámico es a través del uso de ecuaciones diferenciales que modelen la evolución del inventario a lo largo del tiempo. Una forma típica de ecuación diferencial para sistemas de inventarios deteriorables con demanda estocástica es la siguiente:

$$\frac{dI}{dt} = -D(t) + O(t) \quad (8)$$

donde  $I(t)$  es el inventario,  $D(t)$  la demanda en el tiempo y  $O(t)$  los pedidos recibidos.

### **2.2.7.13. Modelo de Reabastecimiento Periódico con Retraso en la Entrega**

El modelo de reabastecimiento periódico con lead time o retardo en la entrega constituye una estrategia de control de inventarios basada en revisiones a intervalos temporales predefinidos, en los cuales se evalúa el nivel de existencias y, en caso de ser necesario, se emiten órdenes de reposición. Este tipo de modelo incorpora de forma explícita el concepto de retardo temporal entre el momento de colocación del pedido y la recepción efectiva del mismo, conocido como tiempo de entrega o lead time. Tal formulación es fundamental para garantizar una coordinación eficiente entre la disponibilidad de productos y la minimización de costos logísticos asociados, tales como costos por desabastecimiento o sobreinventario (FasterCapital, 2024).

En este esquema, la demanda se modela como una variable aleatoria —es decir, sigue un comportamiento estocástico— lo que implica una incertidumbre inherente tanto en la cantidad como

en el momento en que se requieren los artículos. Las decisiones de reabastecimiento no se realizan de manera continua, sino que obedecen a una política de revisión periódica (generalmente cada  $T$  unidades de tiempo). En cada revisión, si el nivel de inventario se encuentra por debajo de un umbral predefinido, se procede a emitir una orden de compra cuyo tamaño es calculado para cubrir la demanda futura esperada durante el ciclo de revisión más el tiempo de entrega.

El componente crítico en este modelo es la presencia de un retardo temporal —el lead time— que puede ocasionar quiebres de stock si no se gestiona adecuadamente. Desde el punto de vista matemático, el sistema puede representarse como una dinámica con retardo o sistema de ecuaciones diferenciales con retardo (DDE, por sus siglas en inglés), en el cual la tasa de variación del inventario en un instante dado depende de condiciones pasadas. Una forma general de representar este comportamiento se expresa mediante una ecuación diferencial con retardo:

$$\frac{dI}{dt} = -D(t) + O(t - \tau) \quad (9)$$

Donde  $\tau$  es el tiempo de entrega.

#### **2.2.7.14. Modelo de Optimización de Costos EOQ Dinámico**

Metropolitana (2020) menciona que los inventarios dinámicos son importantes porque podemos determinar la política de almacén, teniendo en cuenta el entorno cambiante en el cual nos encontremos. Es decir, si usamos un Modelo EOQ estático, puede no ser tan preciso porque se considera como base a una demanda que se piensa que no cambiará a lo largo del tiempo, en cambio cuando use el modelo dinámico EOQ, podemos responder adecuadamente a los cambios que los clientes pueden tener preferencias que cambiarán simultáneamente la demanda al mismo tiempo. Estos tipos de modelos nos permiten ser más eficientes al planificar la producción que va de la mano con una política de almacén administrada por la empresa.

Las empresas tienen dos opciones de almacenamiento en sus inventarios:

- Guardar insumos que se usarán en la fabricación de su mercancía o
- Guardar la propia producción.

Sin embargo, dentro de los inventarios también se pueden tener variaciones en cuanto a la demanda de los productos, lo cual se convierte en una demanda determinística y variable. Lo

anteriormente mencionado se convierte en inventarios dinámicos, puesto que dependiendo de en qué momento se encuentre en el tiempo, la demanda va a cambiar y siempre se debe buscar la optimización de los mismos inventarios.

El modelo dinámico EOQ se basa en la optimización de costos, tomando en cuenta la demanda variable con el tiempo. La ecuación general utilizada para minimizar los costos en una planificación de  $n$  periodos es la siguiente:

$$\min \sum_{t=1}^n (C_t(Q_t) + h_t(I_t)) \quad (10)$$

Sujeto a:

$$I_{t+1} = I_t + Q_t - D_t, \forall t = 1, 2, \dots, n$$

$$I_t \geq 0, Q_t \geq 0, \forall t$$

Donde:

$C_t(Q_t)$  es el costo de producción o pedido en el período  $t$

$h_t(I_t)$  es el costo de almacenamiento del inventario remanente final de  $t$

$I_t$  es el inventario disponible al de final de  $t$

$Q_t$  es la cantidad ordenada en el período t

$D_t$  es la demanda del período t, que varía con el tiempo.

#### **2.2.7.15. Modelos de Mantenimiento Preventivo y Predictivo**

Pinzón (2022) expresa en su trabajo *modelos matemáticos aplicados al mantenimiento predictivo* que los modelos de inventario de mantenimiento preventivo y predictivo buscan optimizar la disponibilidad de repuestos y recursos necesarios para los mantenimientos programados en equipos industriales, proporciona continuidad en el funcionamiento y reduce los costos asociados con paradas inesperadas. El mantenimiento preventivo se basa en actividades que están planificadas en intervalos regulares, mientras que el uso esperado de datos en tiempo real y análisis avanzado permite determinar el momento óptimo de intervención, con esto se lograría minimizar interrupciones y maximizar la vida útil de los activos.

Para llevar una gestión eficiente en estos contextos se debe equilibrar los costos de almacenamiento ( $C_{almacenamiento}$ ) y de desabastecimiento ( $C_{desbastecimiento}$ ), de esta manera se busca minimizar el costo total ( $C_{total}$ ) mediante la ecuación:

$$C_{total} = C_{almacenamiento} + C_{desbastecimiento} \quad (11)$$

En los modelos de inventario para mantenimiento preventivo y predictivo, la ecuación general para minimizar los costos totales se define como:

$$C_{total} = C_{almacenamiento} + C_{desbastecimiento} + C_{orden} + C_{mantenimiento} \quad (12)$$

Donde:

$C_{almacenamiento}$  : representa el costo de mantener repuestos en inventario

$C_{desbastecimiento}$  : es el costo que esta asociado a la falta de repuestos cuando se requiere mantenimiento

$C_{orden}$  : representa el costo de realizar pedidos de repuestos

$C_{mantenimiento}$  : se incluye los costos de mantenimiento preventivo y predictivo.

#### **2.2.7.16. Principales Modelos de Inventario con Enfoque Diferencial.**

La Tabla 2 resume los principales modelos matemáticos de inventarios que utilizan ecuaciones diferenciales que aportan a este trabajo de investigación por sus características:

**Tabla 2:** Principales modelos matemático con ecuaciones diferenciales

| Nombre del Modelo                                              | Conclusión                                                                                                                                                                                                                       | Referencia bibliográfica |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Modelo de reabastecimiento periódico con retraso en la entrega | Toma en cuenta que los repuestos deben llegar a tiempo y así evitar fallas en el mantenimiento. Además, permite planificar reabastecimientos de manera periódica basados en la demanda real y evita el desabastecimiento.        | (FasterCapital, 2024)    |
| Modelo de optimización de costos (EOQ Dinámico)                | Permite un ajuste en la cantidad de pedido según la demanda real. Reduce costos al evitar exceso en el almacenamiento y compras que no son necesarias. Se adapta al escenario de investigación, es decir, para bodegas pequeñas. | (Metropolitana, 2020)    |
| Modelo de deterioro y demanda estocástica                      | Es ideal cuando los repuestos tienen vida útil limitada o los mismos se deterioran. Además,                                                                                                                                      | (Mora Arquez, 2018)      |

---

permite la optimización de pedidos para evitar pérdidas por deterioro y se utiliza cuando hay incertidumbre en la demanda.

---

**Elaborado por: Autores**

**NOTA:** Los demás modelos matemáticos no serán considerados porque no utilizan en su modelo las ecuaciones diferenciales.

## **2.3. Marco Legal**

### **2.3.1. Normativas de Gestión de Inventarios**

La gestión de inventarios se encuentra sujeta a un conjunto de normativas internacionales que buscan homogeneizar los criterios contables y operacionales, promoviendo la transparencia, eficiencia y comparabilidad de los procedimientos aplicados en el control de existencias dentro de las organizaciones. Entre los marcos regulatorios más reconocidos a nivel global destacan las siguientes normativas:

En primer lugar, la Norma Internacional de Contabilidad N° 2 (NIC 2) establece las directrices para la valoración y presentación de inventarios dentro de los estados financieros. Conforme a esta normativa, los inventarios deben ser reportados utilizando el menor valor entre el costo histórico y el valor neto realizable. El

costo incluye todos los gastos relacionados con la adquisición, transformación y otros desembolsos directamente atribuibles a la preparación de los bienes para su uso o venta. Por su parte, el valor neto realizable se define como el precio estimado de venta en condiciones normales de mercado, menos los costos esperados para completar la producción y llevar a cabo la venta efectiva (CPCON, 2023).

Asimismo, a nivel regional, se encuentra la Norma de Información Financiera NIF C-4 de México, que regula el tratamiento contable de los inventarios y su adecuada representación en los estados financieros. Esta normativa establece criterios técnicos para la valoración, presentación y revelación de los inventarios, destacando la necesidad de mantener exactitud y veracidad en la exposición financiera de los activos circulantes. Además, la NIF C-4 incorpora el principio de prudencia contable, al requerir la aplicación de ajustes por deterioro, obsolescencia o pérdida de valor, mediante la constitución de provisiones técnicas que reflejen fielmente la condición real de los inventarios (CPCON, 2023).

Ambos marcos normativos son fundamentales para garantizar que la gestión de inventarios se desarrolle bajo estándares

aceptados internacionalmente, contribuyendo no solo al cumplimiento regulatorio, sino también a una toma de decisiones financiera más sólida, especialmente en sectores con alta rotación de inventarios o con productos sujetos a condiciones de deterioro, como es el caso del sector aeronáutico.

### **2.3.2. Normativas Nacionales**

En el contexto ecuatoriano, la gestión de inventarios en las entidades del sector público se encuentra normada por el Reglamento General para la Administración, Utilización, Manejo y Control de los Bienes y Existencias del Sector Público, emitido por la Contraloría General del Estado (CGE). Esta normativa constituye el marco regulatorio principal para la administración patrimonial de las instituciones estatales, estableciendo lineamientos técnicos y procedimentales que regulan todas las fases del ciclo de vida de los bienes públicos, incluyendo su adquisición, codificación, registro, control físico y contable, uso operativo, mantenimiento, y disposición final (CGE, 2017).

El objetivo fundamental de dicho reglamento es asegurar una gestión racional, eficiente y transparente de los recursos públicos, promoviendo prácticas institucionales que garanticen la custodia, conservación y valorización adecuada de los activos del Estado.

A través de esta normativa, se busca fortalecer los mecanismos de control interno y asegurar el cumplimiento de principios de legalidad, eficiencia administrativa y rendición de cuentas en lo que respecta al manejo de inventarios, tanto en bienes muebles como en existencias estratégicas o de uso recurrente.

## **CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO**

### **3.1. Enfoque de la Investigación**

La investigación tuvo un enfoque mixto cualitativo cuantitativo. Se recopiló información y datos del centro de almacenamiento de material aeronáutico en el Escuadrón Mantenimiento Sistemas Aeronáuticos de la ESMA aplicando herramientas como observación, entrevistas mediante una guía de entrevistas con la finalidad de realizar un diagnóstico de la situación actual de cómo se maneja el inventario de partes y repuestos.

### **3.2. Modalidad de la Investigación**

La presente investigación adopta una modalidad de investigación de campo puesto que se realizaron visitas al Escuadrón Mantenimiento Sistemas Aeronáuticos de la ESMA para recolectar datos en el entorno real.

El diseño de la investigación es experimental y transversal puesto que se busca generar un modelo matemático que se pueda implementar en la gestión de inventarios dentro del centro de almacenamiento de material aeronáutico del Escuadrón Mantenimiento Sistemas Aeronáuticos de la ESMA.

### **3.3. Tipo de Investigación**

El presente trabajo de investigación se realizará inicialmente en base a dos tipos de investigación, que son la investigación exploratoria y descriptiva; de tipo exploratoria porque se hace referencia a una identificación profunda sobre modelos de gestión de inventarios que utilizan ecuaciones diferenciales dado que han sido poco estudiados debido a su complejidad y además de los datos reales obtenidos del Centro de almacenamiento de material aeronáutico del Escuadrón Mantenimiento Sistemas Aeronáuticos de la ESMA con lo que se llega a una identificación del problema. Mientras que es de tipo descriptiva puesto que se realiza levantamiento de información que será sometido a análisis con el objetivo de identificar las características del problema dentro del centro de almacenamiento de material aeronáutico.

Así mismo, el estudio también se enmarca dentro de una investigación aplicada dado que el objetivo es desarrollar un modelo matemático basado en ecuaciones diferenciales que permitan la optimización en la gestión de inventarios de partes y repuestos en el centro de almacenamiento de material aeronáutico. Con la investigación se busca generar soluciones prácticas para mejorar la eficiencia en la gestión de inventarios y la toma de decisiones.

### **3.4. Población y Muestra**

#### **3.4.1. Población.**

El presente trabajo de investigación será desarrollado en el Escuadrón Mantenimiento Sistemas Aeronáuticos de la ESMA, en donde funciona el centro de almacenamiento de material aeronáutico encargado de suministrar materiales para el mantenimiento de las aeronaves. Cabe indicar que para esto se cuentan con dos tipos de aeronaves que son utilizadas por los cadetes para su entrenamiento.

De esta forma se cuenta con 12 aviones denominados Diamond DA20C-1 que son para el entrenamiento básico de los cadetes y lo realizan en 3er año de estudio. Ver Figura 6.



**Figura 6:** Aeronave Diamond DA20C-1

**Fuente:** (Infodefensa, 2024)

Además, cuentan con 8 Aviones Grob G120TP-A que lo utilizan los cadetes de 4to año para su entrenamiento más avanzado. Ver Figura 7.



**Figura 7:** Aeronave Grob G120TP-A

**Fuente:** (Webinfomil, 2020)

LOGÍSTICA (2020) indica en el Manual de mantenimiento que en relación a las actividades o tareas de mantenimiento que se realiza en el Escuadrón Mantenimiento, es de línea y base nivel II, limitándose a realizar inspecciones programadas como son: pre-vuelos, entre-vuelos, post-vuelos, reabastecimiento de combustible, mantenimiento programado y no programado, reemplazo de piezas y partes menores, entre otros; podrán ser corregidos por el personal técnico habilitado, verificado por personal de Supervisores o Certificadores.

En relación a los tipos de mantenimiento programados y no programados, se puede acotar lo siguiente.

**Programados:** Los mantenimientos programados son los más frecuentes, porque se considera el número de horas de vuelo.

Para la aeronave Diamond DA20C-1 se realiza mantenimiento programado cuando estas cumplen 100, 200 horas de vuelo, inspecciones anuales y de corrosión cada 6 meses. Y cuando no vuelan las aeronaves, puesto que están en mantenimiento tienen inspecciones de preservación semanales.

Por otro parte la aeronave Grob G120TP-A tienen inspecciones de 50, 100, 300 y de 600 horas de vuelo, así mismo tienen inspección de corrosión y si no están volando tienen inspecciones de preservación con frecuencia semanal

**No programados:** Los no programados son los que ocurren a diario, durante el uso de los aviones, por ejemplo, durante los entrenamientos de vuelo regresan ponchada la llanta, daño de luz, desconfiguración de pantalla, pérdida de potencia de motor, estos mantenimientos se realizan en el escuadrón de mantenimiento.

Cuando existen fallas más grandes en el motor se envía a reparar a una casa reparadora.

Existen inspecciones más específicas de los aviones que no se realizan en escuadrón de mantenimiento, sino que tienen que irse a un taller certificado.

Sin embargo, cabe resaltar que no realiza mantenimiento de base nivel III, es decir, aquellas que son inspecciones mayores, reconstrucción completa de partes, ensamblajes, modificaciones, pruebas de funcionamiento, reparaciones estructurales mayores ya que no se cuenta con las capacidades relacionadas a entrenamiento, infraestructura, equipos, herramientas, bancos de prueba e información técnica especializada (Dirección de Logística, 2020).

De esta manera para los mantenimientos realizados en el escuadrón de mantenimiento los insumos que se vayan a utilizar durante esta actividad son solicitados por el centro de almacenamiento de material aeronáutico a la bodega de Abastecimiento, puesto que se considera la distancia entre la bodega de Abastecimiento y el área de mantenimiento de las aeronaves, por lo que la ubicación del centro de almacenamiento facilita el acceso de los materiales que se utilizan durante los mantenimientos. En el centro de almacenamiento es una bodega

de alta rotación, y los materiales se consumen en cada mantenimiento.

De esta forma la población para el presente trabajo de investigación está conformada por 96 ítems que se utilizan para el mantenimiento de los aviones en el Centro de almacenamiento de material aeronáutico.

Los mismos que están clasificados de la siguiente manera según consta en la Tabla 3.

**Tabla 3:** Clasificación del inventario por tipo de proceso

| Tipo de proceso               | Cantidad de ítems |
|-------------------------------|-------------------|
| Material de aseo              | 21                |
| Lubricantes y aditivos        | 11                |
| Equipo de protección personal | 8                 |
| Material de Ferretería        | 56                |
| Total                         | 96                |

**Elaborado por: Autores**

**3.4.2. Muestra.**  
**3.4.2.1. Análisis ABC.**

Para la determinación del tamaño de la muestra se utilizará el muestreo intencional basado en la frecuencia de uso medida por la cantidad total consumida, por tal motivo, los elementos de la muestra se seleccionarán empleando el Análisis ABC con lo cual se decidirá sobre los repuestos que representen el 95% del uso, es decir aquellos que clasifiquen como categoría A y B.

Torres Sierra (2022) menciona en su trabajo de investigación Análisis ABC y su relevancia en la gestión de inventarios: un estudio de revisión. Análisis sistemático de literatura sobre el Sistema de control de inventarios ABC en el cual indica que es muy útil para el mantenimiento del inventario de una empresa puesto que clasifica de manera ordenada según el valor que representa y costos de ventas, luego dividirlos en categorías por la importancia.

El análisis ABC es una técnica para priorizar la gestión de inventarios fundamentada en el principio de Pareto (80/20), el cual indica que un pequeño porcentaje de los ítems suele representar la mayor parte del valor del inventario (Torres Sierra, 2022).

Se clasifica en tres categorías a los ítems del inventario según el análisis ABC.

**Categoría A:** Aquellos ítems que representan un alto valor económico, entre 70% y 80% del valor total del inventario y un pequeño porcentaje ítems, entre 10% y 20% de los ítems.

**Categoría B:** Aquellos ítems que representan un valor económico intermedio, entre 15% y 25% del valor total del inventario y un porcentaje ítems, aproximadamente 30% de ítems.

**Categoría C:** Aquellos ítems que representan un bajo valor económico, alrededor del 5% del valor total del inventario y un porcentaje alto de ítems, entre 50% y 60% de los ítems.

Para calcular el valor del análisis ABC se realiza de la siguiente manera:

Se comienza calculando el valor anual del consumo de cada ítem

$$\text{Valor anual} = \text{Demanda anual} \times \text{Costo unitario} \quad (13)$$

Luego se ordena los ítems en forma ascendente de mayor a menor según el valor anual y se suman los totales.

Se calcula el porcentaje acumulado de cada ítem respecto al total de la siguiente forma:

*Porcentaje acumulado*

$$= \frac{\text{Valor acumulado}}{\text{Valor total del inventario}} \times 100 \quad (14)$$

Una vez determinado el porcentaje acumulado se clasifican los ítems según corresponda por categorías:

**A:** Hasta el 70% - 80% del valor acumulado

**B:** Del 70% - 80% hasta el 90-95%

**C:** Resto de ítems hasta completar el 100%

En el presente trabajo para desarrollar el análisis ABC se utilizó el software Python, en la Tabla 4 se muestra los siguientes resultados resumidos por categorías A-B-C.

**Tabla 4:** Resumen de clasificación ABC basado en la cantidad total consumida

| Categoría    | Número de ítems | Total consumido | % del Consumo total |
|--------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| <b>A</b>     | 5               | 126.00          | 79,25%              |
| <b>B</b>     | 11              | 25.00           | 15,72%              |
| <b>C</b>     | 80              | 8.00            | 5,03%               |
| <b>Total</b> | 96              | 618,29          | 100,00%             |

Se puede observar en la Figura 8 que la categoría A representa solo el 5.4% del total de ítems, sin embargo, acumulan el 79,25% del consumo total. La categoría B cubre un 11,9% del total de ítems, pero acumula el 15.72% del total consumido. Mientras que la categoría C contiene al 82.5% de los ítems representando el 5.03% del consumo total

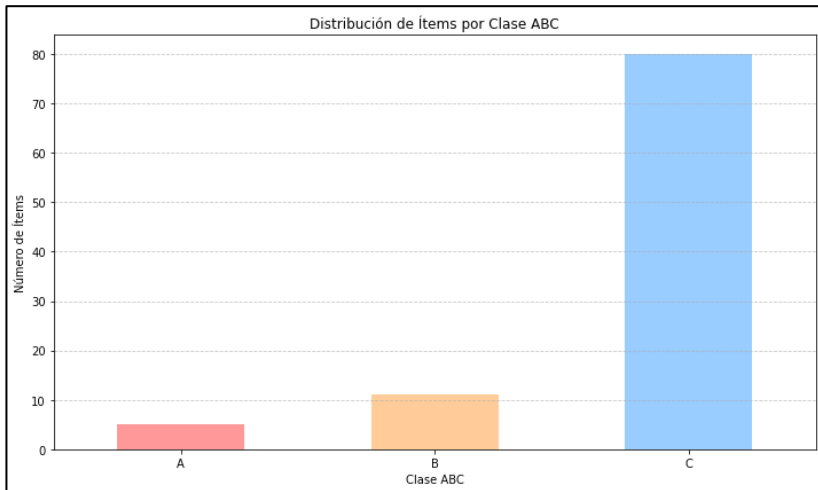


**Figura 8: Distribución de ítems por clase ABC**

Los resultados totales por categorías se muestran en el Anexo 4, mientras que la Tabla 5 muestra los resultados de la Categoría A y B.

**Tabla 5:** Resultados Análisis ABC - Categoría A y B

| <b>RESULTADOS ANALISIS ABC</b>                          |                              |                        |                    |                  |
|---------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------|--------------------|------------------|
| <b>Detalle</b>                                          | <b>Cant. Total Consumida</b> | <b>% Participación</b> | <b>% Acumulado</b> | <b>Clase ABC</b> |
| PAÑOS ABSORVENTES DE LIMPIEZA 28 CMX42CM80 ROLLO BLANCO | 65                           | 40,88                  | 40,88              | A                |
| GUANTES NITRILO/TIPO QUIRURGICOS COLOR AZUL (CAJA)      | 41                           | 25,79                  | 66,67              | A                |
| BROCA DE COBALTO 1/8                                    | 10                           | 6,29                   | 72,96              | A                |
| LIMPIADOR DE CONTACTO SPRAY 11 OZ                       | 5                            | 3,14                   | 76,10              | A                |
| CUCHILLA COBALTO 1/4 X 4"                               | 5                            | 3,14                   | 79,25              | A                |
| BROCA DE COBALTO 5/32                                   | 5                            | 3,14                   | 82,39              | B                |
| OVEROL DESECHABLE PARA APLICAR QUIMICOS BLANCOS         | 2                            | 1,26                   | 83,65              | B                |

|                                  |   |      |       |   |
|----------------------------------|---|------|-------|---|
| CUCHILLA COBALTO 3/8 X 4"        | 2 | 1,26 | 84,91 | B |
| BROCA DE METAL HSS 5/32 (DIN338) | 2 | 1,26 | 86,16 | B |
| BROCA DE METAL HSS 5/16 (DIN338) | 2 | 1,26 | 87,42 | B |
| BROCA DE METAL HSS 3/16 (DIN338) | 2 | 1,26 | 88,68 | B |
| BROCA DE METAL HSS 1/8 (DIN338)  | 2 | 1,26 | 89,94 | B |
| BROCA DE METAL HSS 1/4 (DIN338)  | 2 | 1,26 | 91,19 | B |
| BROCA DE METAL HSS 1/2 (DIN338)  | 2 | 1,26 | 92,45 | B |
| BROCA DE COBALTO 3/16            | 2 | 1,26 | 93,71 | B |
| BROCA DE COBALTO 1/8             | 2 | 1,26 | 94,97 | B |

---

**Elaborado por: Autores**

La Figura 9 nos muestra los 20 productos más relevantes según el criterio considerado la cantidad total consumida.

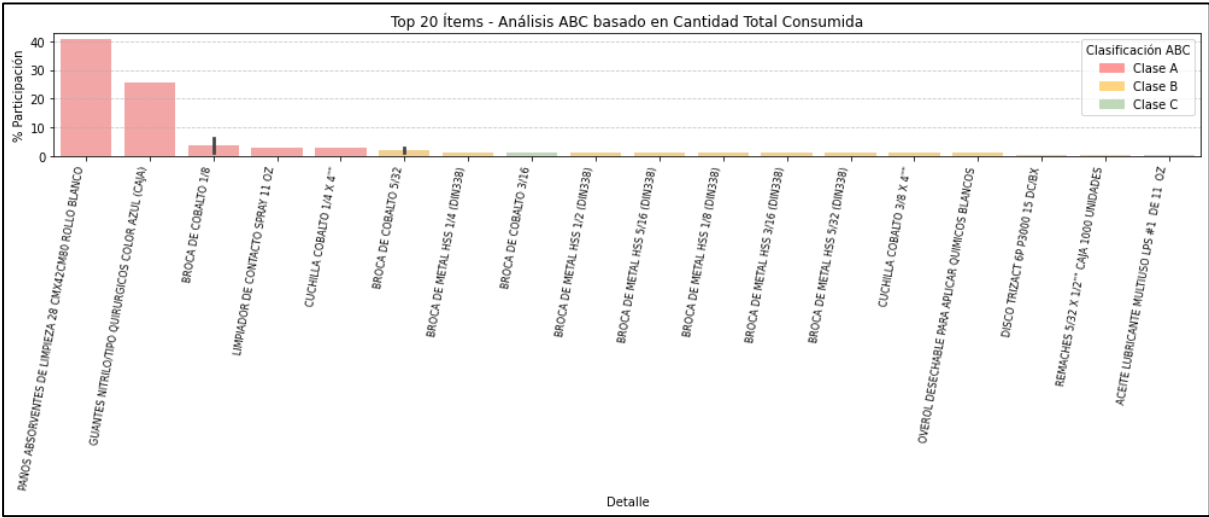


**Figura 9:** Resultados Análisis ABC  
Elaborado por: Autores

De la Tabla 5 donde se muestran los datos obtenidos se detallan a continuación los campos a considerar. Ver Tabla 6:

**Tabla 6:** Información de la data

| Campo                 | Descripción                                                        |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Tipo de proceso       | Clasificación del inventario de acuerdo a características del ítem |
| Detalle               | Descripción del ítem                                               |
| Cantidad recibida     | Número de unidades recibidas por ítem                              |
| Unidad Entrega        | Unidad de medida del ítem                                          |
| Cant. Total Consumida | Número de unidades consumidas por ítem                             |
| Valor total consumido | Valor en dólares de los ítems                                      |
| Saldo actual          | Número de unidades disponibles                                     |

Elaborado por: Autores

### 3.5. Operacionalización de las Variables

En la Tabla 7 se muestra la operacionalización de las variables objeto de estudio.

**Tabla 7:** Operacionalización de variables

| VARIABLES                     | DEFINICIÓN CONCEPTUAL                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | DIMENSIONES                 | INDICADORES                        | INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN                          |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------|
| <b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                             |                                    |                                                   |
| <b>Gestión de inventarios</b> | Gupta y Maranas (2021) indica que la gestión de inventarios aplicada en la aviación busca garantizar la disponibilidad de repuestos, partes y piezas para el mantenimiento de las aeronaves minimizando costos y tiempos de inactividad. Debido a la complejidad y criticidad de los insumos se debe integrar modelos dinámicos que permitan predecir el | Tiempo de reabastecimiento  | Tiempo medio de entrega            | Registro de órdenes de compra (Excel/Sistema ERP) |
|                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Nivel de inventario         | Cantidad de unidades en inventario | Registro de stock                                 |
|                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Demanda diaria de repuestos | Consumo promedio por día           | Registro de consumo de repuestos                  |
|                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Faltantes de repuestos      | Número de veces con faltantes      | Registro de lista de espera                       |

|                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                   |                                  |                                              |
|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------|
|                                                               | comportamiento del stock en función de la tasa de consumo, los retrasos de reposición y los costos asociados.                                                                                                                                                                             | Costo de almacenamiento           | Costo mensual de stock           | Reporte financiero                           |
|                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Costo de pedidos urgentes         | Gasto en pedidos urgentes        | Facturas y reportes de compras de emergencia |
| VARIABLE DEPENDIENTE                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                   |                                  |                                              |
| Modelo de gestión de inventarios con ecuaciones diferenciales | Zipkin, (2000) menciona que un modelo de gestión de inventarios con ecuaciones diferenciales es una representación matemática del comportamiento dinámico de los niveles de inventario. Estos modelos utilizan ecuaciones diferenciales para optimizar la decisiones de reabastecimiento. | Variación del nivel de inventario | Tasa de variación del inventario | Registro de stock en intervalo de tiempo     |
|                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Tasa de demanda                   | Función de demanda               | Registro histórico de consumo de ítems       |
|                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Tasa de reabastecimiento          | Función de reabastecimiento      | Regisro de pedido y tiempo de entrega        |
|                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Equilibrio del inventario         | Resultado estacionario           |                                              |

**Elaborado por: Autores**

### **3.5.1.Variable Independiente.**

Gestión de inventarios

### **3.5.2.Variable Dependiente.**

Modelos de inventarios con ecuaciones diferenciales

## **3.6. Técnicas e Instrumentos**

### **3.6.1.Técnicas de Investigación.**

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizarán diversas técnicas de investigación que ayudarán a la recolección, análisis y modelamiento de la información necesaria para validar la dinámica del inventario y mejorar los procesos de reabastecimiento. En un inicio se realizará una revisión de la literatura relacionada con modelos de inventarios y ecuaciones diferenciales aplicada a la gestión de inventarios en el ámbito aeronáutico para lo cual se empleará un análisis documental, esta técnica ayudará a identificar los modelos matemáticos adecuados y las estrategias efectivas en la optimización del inventario (Silver, 2016).

Por otro lado, se aplicará la observación directa que permitirá levantar la información sobre las variables operativas del Centro de almacenamiento de material aeronáutico, tales como el nivel de inventario, tiempo de reabastecimiento y frecuencia de pedidos

urgentes, con la ayuda de una guía estructurada que está basada en los indicadores claves de gestión (Chopra, 2019).

Taha (2017) propone que para validar el modelo matemático propuesto se puede desarrollar mediante un sistema computacional, en este caso se utilizará Python, en donde se utilizarán ecuaciones diferenciales para modelar la evolución del inventario considerando distintas estrategias de gestión. De esta manera se puede evaluar distintos escenarios sin afectar la operación real.

Para finalizar se realizarán entrevistas a expertos en logística y mantenimiento aeronáutico con la finalidad de identificar los principales efectos y evaluar la viabilidad de las estrategias propuestas con lo cual se garantizaría un enfoque completo para el diseño, formulación y validación del modelo matemático propuesto.

### **3.6.2. Instrumentos de Investigación.**

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizarán algunos instrumentos de investigación que facilitarán la recolección de información cuantitativa y cualitativa que son necesarios para la formulación y validación del modelo matemático. Inicialmente se utilizarán los registros históricos de inventarios los mismos que

serán obtenidos del sistema de gestión empresarial con el que cuenta el Centro de almacenamiento de material aeronáutico los cuales abordarán información sobre las dimensiones consideradas para el estudio puesto que estos datos serán vitales para la parametrización del Modelo EOQ dinámico con reabastecimiento periódico (Silver, 2016).

Otro instrumento a utilizar es la guía de observación, la misma que ayudará a registrar el comportamiento del inventario en bodega, identificando los estándares de reposición, tiempos de entrega y con qué frecuencia se realizan pedidos urgentes. De esta manera con este instrumento se logrará entender la dinámica de las operaciones y ayudará en la validación de los supuestos del modelo planteado (Chopra, 2019).

De manera complementaria se validará por expertos en logística aeronáutica la información sobre los desafíos actuales que enfrenta la gestión de repuestos, criterios para la toma de decisiones y la opinión sobre la viabilidad del modelo propuesto.

Por otro lado, también se validará un cuestionario que está dirigido a los encargados de la bodega, con preguntas que están enfocadas en medir la eficacia actual del sistema de inventario, con lo que se identificará los problemas recurrentes y se

determinará aquellos factores que afectan la disponibilidad de repuestos críticos (Nahmias, 2015).

Por último, un instrumento relevante para el desarrollo del presente trabajo es el uso de un software para simulación computacional, el mismo que ayudará en el análisis de distintos escenarios considerando el modelo matemático basado en ecuaciones diferenciales (Taha, 2017).

### **3.7. Plan de Recolección de Datos**

Para el presente trabajo, el plan de recolección de datos en la que se combina la información cualitativa y cuantitativa. Para el desarrollo de la fase cualitativa se realizaron visitas al área de mantenimiento para poder realizar la observación, para lo cual se utilizó una guía de observación la que permitió levantar información sobre la situación actual del manejo de la gestión de inventarios de partes y repuestos, y así poder justificar la pertinencia de la aplicabilidad de modelos matemáticos que estén basados en ecuaciones diferenciales. El Anexo 9 muestra la guía de observación utilizada.

Además, se recopilarán datos históricos del Centro de almacenamiento de material aeronáutico, en la que se incluya la demanda diaria, los tiempos de reabastecimientos, niveles de

inventario, tiempos de entrega, la frecuencia de faltantes, costos de almacenamiento y los costos que están asociados a pedidos urgentes. Con esta información se podrá parametrizar las ecuaciones del modelo, especialmente la tasa de demanda variable  $D(t)$  y la cantidad optima de pedido  $Q^*(t)$ , los cuales son elementos claves para el modelo EOQ dinámico. Los datos serán levantados a través de registros y hojas de control de inventario y cuestionarios.

Por otro lado, se realizaron entrevistas al personal técnico y que son responsables de la logística para poder determinar los criterios operativos, la percepción del nivel del servicio y la validación de la simulación del modelo. El Anexo 10 muestra la guía de entrevista utilizada.

El resultado de la recolección de datos se puede observar en la Tabla 8 que detalla los materiales que se encuentran en el Centro de almacenamiento de material aeronáutico.

**Tabla 8:** Registro y control de material de la bodega logístico ESMA

| Ord . | Tipo de proceso | Detalle | Cantida<br>d<br>recibida | Unida<br>d<br>Entreg<br>a | Cant.<br>Total<br>Consumid<br>a | Valor<br>total<br>consumid<br>o | Sald<br>o<br>actu<br>al |
|-------|-----------------|---------|--------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
|-------|-----------------|---------|--------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------|

|    |                                    |                                                         |     |    |    |         |     |
|----|------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----|----|----|---------|-----|
| 1  | Equipos de protección personal     | Overol desechable para aplicar químicos blancos         | 2   | UN | 2  | \$29,90 | 0   |
| 2  | Equipos de protección personal     | Guante de nylon y poliuretano                           | 19  | UN | 0  | \$0,00  | 19  |
| 3  | Equipos de protección personal     | Guantes nitrilo/tipo quirúrgicos color azul (caja)      | 398 | PR | 41 | \$10,82 | 357 |
| 94 | Material de lubricantes y aditivos | Aceite protector de corrosión para equipos electrónicos | 5   | UN | 0  | \$0,00  | 5   |
| 95 | Material de lubricantes y aditivos | Grasa para fuselaje #6 de 14 oz                         | 3   | UN | 0  | \$0,00  | 3   |
| 96 | Material de lubricant              | Aceite anticorrosi                                      | 50  | UN | 0  | \$0,00  | 50  |

**Elaborado por: Autores**

### **3.7.1. Validación de los Datos.**

En el presente trabajo se realizó la validación de los datos, para constatar que los datos estén completos y determinar si existen datos faltantes en las variables claves como cantidad recibida, consumo total y saldo actual. Por otro lado, también se verificaron si existían valores negativos puesto que no serían valores lógicos en cantidades o montos relacionados con inventarios. También se realizó la comprobación de filas duplicadas y validación de la consistencia interna de los datos del inventario. Por último, se realizó la estandarización de los tipos de unidades, de esta manera se asegura que los datos sean coherentes y que la calidad de los datos sea óptima para el desarrollo del modelo matemático de gestión de inventarios.

Este proceso se realizó utilizando la herramienta Python, a continuación, se muestran los resultados obtenidos en la Figura 10 y en el Anexo 13 se muestra el código en Python. Se puede observar que no existen valores faltantes, así como filas

duplicadas y de esta misma forma no se observan valores negativos en los datos.

```
columnas del archivo: ['Ord.', 'Tipo de proceso', 'Detalle', 'Cantidad recibida', 'Unidad Entrega', 'Cant. Total Consumida', 'Valor total consumido', 'Saldo actual']

Valores faltantes por columna:
Ord. 0
Tipo de proceso 0
Detalle 0
Cantidad recibida 0
Unidad Entrega 0
Cant. Total Consumida 0
Valor total consumido 0
Saldo actual 0
dtype: int64

Número de filas duplicadas: 0

Valores negativos por columna:
Cantidad recibida 0
Cant. Total Consumida 0
Valor total consumido 0
Saldo actual 0
dtype: int64

Filas con inconsistencias en el saldo: 0

Ejemplos de filas con errores de saldo:
Empty DataFrame
Columns: [Ord., Tipo de proceso, Detalle, Cantidad recibida, Unidad Entrega, Cant. Total Consumida, Valor total consumido, Saldo actual, Saldo calculado, Error en saldo]
Index: []
```

**Figura 10:** Resultados de Validación de datos  
**Elaborado por: Autores**

Además, se realizó la validación estadística de los datos mediante Python, en donde se determinaron las estadísticas descriptivas, correlaciones claves y el coeficiente de variación para determinar la consistencia de los datos. En el Anexo 14 se muestra el código en Python y resultados obtenidos.

En la Tabla 9 se pueden observar los resultados obtenidos mediante estadística descriptiva, los mismos que indican que existe una alta dispersión entre las cantidades, esto permite indicar que algunos de los ítems son más utilizados que otros.

**Tabla 9:** Resultados de validación estadística de datos

| Métrica        | Cantidad recibida | Total consumido | Valor consumido | Saldo actual |
|----------------|-------------------|-----------------|-----------------|--------------|
| Media          | 30.55             | 1.66            | 6.44            | 28.90        |
| Mínimo         | 1.00              | 0.00            | 0.00            | 0.00         |
| Máximo         | 1552.00           | 65.00           | 140.00          | 1487.00      |
| Desv. Estándar | 162.54            | 7.86            | 19.04           | 155.27       |

**Elaborado por: Autores**

Por otro lado, la correlación entre las variables cantidad recibida y saldo actual presenta una correlación alta positiva con un valor de 0.9998 y con la variable Total consumido la correlación es igual a 0.9294.

Mientras que la variable Valor total consumido no presenta mucha correlación con las demás variables en donde su valor de correlación es menor a 0.2, esto nos permite indicar que hay uso de materiales a bajo costo.

Al analizar el coeficiente de variación como se observa en la Tabla 10, se tiene que considerar que cuando es mayor al 100%,

la variabilidad es muy alta, sin embargo, este comportamiento es muy común en inventarios de materiales muy diversos.

**Tabla 10:** Coeficiente de variación de datos

| Variable          | CV (%) |
|-------------------|--------|
| Cantidad recibida | 532%   |
| Total consumido   | 474%   |
| Valor consumido   | 296%   |
| Saldo actual      | 537%   |

**Elaborado por: Autores**

Finalmente, se puede inferir que los datos son estadísticamente coherentes, aunque presentan una alta dispersión, lo cual es normal en datos de inventarios de materiales, no se identificaron errores en el saldo. Por otro lado, al existir una correlación baja entre el valor consumido con las demás variables estos podrían indicar que existe posibles errores en los precios por unidad.

**3.8. Plan de Procesamiento de Información**

Para el plan de procesamiento de información en el presente trabajo de investigación se considera una secuencia de técnicas que están orientadas a transformar los datos levantados para la validación del modelo matemático.

Se inicia realizando un ajuste de la demanda  $D(t)$  mediante técnicas estadísticas lo cual permitirá modelar su comportamiento en el tiempo. De manera paralela se desarrollará la simulación utilizando el software Python del sistema de ecuaciones diferenciales lo cual permitirá realizar comparaciones con diferentes parámetros de entrada y de esta manera evaluar el impacto en los niveles de inventario y costos. Finalmente se integrarán los resultados numéricos y cualitativos que permitirá contrastar la propuesta del modelo con las condiciones reales del sistema logístico.

### **3.8.1. Modelo Matemático Propuesto para la Gestión de Inventarios**

Para el presente trabajo como se ha venido detallando en los capítulos anteriores los modelos matemáticos que utilizan ecuaciones diferenciales y que se ajustan al objetivo del estudio son: Modelo de reabastecimiento periódico con retraso en la entrega, modelo de optimización de costos (EOQ Dinámico) y modelo de deterioro y demanda estocástica.

Considerando los escenarios planteados entre los tres modelos anteriores se considerará al modelo de reabastecimiento periódico con retraso en la entrega y modelo de optimización de costos (EOQ Dinámico) puesto que se consideran tiempos de entrega variables, permite programar pedidos en intervalos regulares lo cual ayuda a evitar faltantes, son claves para repuestos críticos puestos que consideran los retrasos logísticos y facilitan la gestión en bodega pequeñas que no permite sobrecargar el inventario.

Por otro lado, el modelo de deterioro y demanda estocástica es descartado puesto que sería útil solo si se manejara repuestos con vida útil corta o cuyo deterioro sea relevante, como lubricantes o sellos que tienen fecha de caducidad rápida.

Por lo tanto, el modelo propuesto es la combinación de los modelos de reabastecimiento periódico y el EOQ dinámico, puesto que se enfoca en dos vías, por un lado, si el suministro es muy irregular se prioriza el modelo de reabastecimiento periódico con retraso en la entrega, mientras que si se desea minimizar los costos y optimizar la eficiencia se ajusta el modelo EOQ dinámico.

### **3.8.2. Formulación del Modelo Matemático**

La estructuración del modelo matemático está basada en la combinación de los modelos de reabastecimiento periódico y EOQ dinámico utilizando ecuaciones diferenciales que permite representar la evolución del nivel de inventario y ayuda en la optimización del sistema de gestión de inventarios.

Considerando la información obtenida de la muestra se puede considerar los siguientes campos que son claves en la construcción del modelo, entre estas se puede considerar.

**Cantidad recibida:** es la cantidad reabastecida en un lote

**Cantidad total consumida:** demanda total

**Saldo actual:** es el inventario actual

**Valor total consumido:** se utiliza para ponderar los costos.

**Supuestos del modelo:** Para la construcción del modelo se va a plantear los siguientes supuestos.

La demanda varía en el tiempo  $D(t)$ , pero se puede estimar como una tasa continua

El inventario se repone de manera periódica con un lote  $Q(t)$  que está definido por el EOQ Dinámico

El inventario se reduce de manera continua por el consumo y se incrementa instantáneamente en el punto de reabastecimiento.

### **3.8.2.1. Modelo Matemático con Ecuaciones Diferenciales**

Para obtener una solución que explique mejor los resultados se necesita describir de una mejor forma el problema por lo que se debe formar un sistema de ecuaciones diferenciales, con una ecuación que mida la evolución del inventario entre reabastecimientos y otra que mida la condición de reabastecimiento con EOQ dinámico.

#### **Ecuación 1**

**Reabastecimiento Periódico con Retraso:** El nivel de inventario  $I(t)$  está determinado por la tasa de reabastecimiento y la tasa de demanda. La dinámica del inventario está modelada con la ecuación diferencial:

$$\frac{dI(t)}{dt} = -D(t) + \sum_{n=0}^{\infty} Q(t_n) * \delta(t - t_n) \quad (15)$$

Siendo:

$I(t)$ : Nivel de inventario en el tiempo

$D(t)$ : Tasa de Demanda

$Q_t$ : Cantidad reabastecida en el instante  $t_n$

$\delta(t$

$- t_n)$ : Función que modelo el reabastecimiento instantaneo en el tiempo  $t$

En los puntos de reabastecimientos donde  $t = t_n$

$$I(t_n^+) = I(t_n^-) + Q(t_n) \quad (16)$$

Donde:

$I(t_n^+)$  es el nivel de inventario después del reabastecimiento

$I(t_n^-)$  es el nivel de inventario antes del reabastecimiento

$Q(t_n)$  es la cantidad óptima de pedido, la misma que es calculada con EOQ dinámico tomando en cuenta el retraso en la entrega  $L$ .

## Ecuación 2

**Condición de Reabastecimiento Periódico (EOQ Dinámico):** Considerando las  $T_r$  unidades de tiempo, es decir, los periodos de revisión se realiza un pedido. El inventario nuevo se aumenta en una cantidad que es calculada por el modelo EOQ dinámico. Para determinar la cantidad optima que se debe

ordenar en cada ciclo se puede representar de la siguiente manera:

$$Q(t) = \sqrt{\frac{2 * K * D(t)}{h(t)}} \quad (17)$$

Siendo:

$K$ : costo fijo de ordenar

$h(t)$ : costos de mantenimiento del inventario por ítem

$D(t)$ : demanda estimada en el tiempo  $t$

### **3.8.3. Sistema de Ecuaciones Diferenciales del Modelo Propuesto**

El modelo matemático propuesto se lo presenta como un sistema de ecuaciones diferenciales que combina la evolución dinámica del inventario, el reabastecimiento periódico y el cálculo del EOQ óptimo.

**Variables del modelo:** Las variables a considerar son las siguientes:

$I(t)$ : Nivel de inventario en el tiempo  $t$  (Saldo actual)

$D(t)$ : Tasa de Demanda en el tiempo  $t$  (Cant. Total Consumida)

$Q(t)$ : Cantidad a ordenar en el tiempo  $t$

$t_n$ : Tiempo en que se realiza el reabastecimiento (Semanal)

$K$ : costo fijo de ordenar

$h(t)$ : costos de mantenimiento del inventario por ítem y por tiempo  
(% del valor total consumido)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI(t)}{dt} = -D(t) + \sum_{n=0}^{\infty} Q(t_n) * \delta(t - t_n) \\ Q(t_n) = \sqrt{\frac{2 * K * D(t_n)}{h(t_n)}} \\ I(t_n^+) = I(t_n^-) + Q(t_n) \end{array} \right. \quad (18)$$

El sistema propuesto nos permite modelar como varía el inventario de manera continua considerando una demanda diaria, y permite observar cómo se actualiza el nivel de inventario con los reabastecimientos obtenidos de manera dinámica.

La tasa de demanda continua ( $D$ ) por cada ítem se puede estimar de la siguiente manera:

$$D_i = \frac{\text{Cantidad total consumida}_i}{T} \quad (19)$$

Siendo T el período de observación, para el presente trabajo es mensual.

Por otra parte, para determinar el costo de mantener el inventario  $h_i$ , se lo obtiene mediante una estimación práctica, considerando un porcentaje:

$$h_i = \alpha * \frac{\text{Valor total consumida}_i}{\text{Cant. total consumida}_i} \quad (20)$$

El valor estimado  $Q_i$  que indica el EOQ dinámico se lo realiza mediante la siguiente formula:

$$Q_i = \sqrt{\frac{2 * K * D_i}{h_i}} \quad (21)$$

Considerando el valor de  $D_i$ ,  $h_i$  y  $Q_i$  el modelo propuesto para cada ítem i se formularia de la siguiente manera:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_i(t)}{dt} = -D_i + Q_i * \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t - t_{n,i}) \\ Q_i = \sqrt{\frac{2 * K * Q_i}{h_i}} \\ D_i = \frac{\text{Cantidad total consumida}_i}{T} \\ h_i = \alpha * \frac{\text{Valor total consumida}_i}{\text{Cant. total consumida}_i} \end{array} \right. \quad (22)$$

### 3.8.4. Simulación de Inventario

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se realizó simulación del modelo matemático de gestión de inventarios propuesto para lo cual se ha utilizado el Software Python, el cual se utilizaron librerías especializadas para poder hacer el modelo matemático y permiten ver los resultados. Cabe recalcar que el modelo propuesto está compuesto por el Modelo EOQ Dinámico y de reabastecimiento periódico el mismo que está basado en ecuaciones diferenciales, las mismas que se pueden utilizar como herramienta para bosquejar la evolución del inventario de manera continua.

Para poder realizar las simulaciones en Python se hicieron uso de las siguientes librerías:

**Pandas:** la misma que se utiliza para la carga y manejo de datos que provienen de archivos con extensión Excel, además ayuda a la limpieza y convierte los datos en números para los cálculos necesarios.

**Numpy:** Se utiliza para realizar cálculos matemáticos y estadístico del modelo, especialmente en la simulación de la demanda aleatoria y operaciones en vectores.

**Matplotlib:** Esta librería es utilizada para la visualización de resultados.

**IPython.display:** Permite mostrar tablas de resultados de manera clara y con estructura en las simulaciones.

Se puede observar que el modelo matemático se simuló utilizando el siguiente código en Python para el Escenario 1, en donde se consideraron los siguientes parámetros, 12 meses de análisis, el costo por orden  $K=50$ , se considera un porcentaje de 0.25 de mantenimiento sobre el valor, la simulación se hizo considerando 24 meses y el reabastecimiento cada 3 meses. Ver Figura 11.

```

In [38]: # Simulación para cada producto
tiempo = np.arange(simulacion_meses + 1)

plt.figure(figsize=(14, 6))
lineas = []
etiquetas = []
simulacion_resultados = []

for idx, row in df.valid.iterrows():
    D_i = row["D_i"]
    Q_i = row["Q_i"]
    nombre = str(row["Detalle"])

    if not nombre or pd.isna(nombre):
        continue

    inventario = [Q_i] # inventario inicial
    for t in range(1, len(tiempo)):
        I_t = inventario[-1] - D_i
        if t % reabastecimiento_cada == 0:
            I_t += Q_i
        inventario.append(I_t)

    simulacion_resultados.append(("Producto": nombre, **{f"Mes {i}": inv for i, inv in enumerate(inventario)}))
    linea, = plt.plot(tiempo, inventario, label=nombre)
    lineas.append(linea)
    etiquetas.append(nombre)

```

**Figura 11:** Código Python del modelo matemático en Escenario 1

**Elaborado por: Autores**

Por otro lado, para el escenario 2, se consideró un horizonte de análisis de 24 meses y el tiempo de reabastecimiento es ajustable. En la Figura 12 se muestra el código Python utilizado para modelar el modelo matemático para el escenario 2.

```

# Simulación con frecuencia de reabastecimiento adaptativa
tiempo = np.arange(simulacion_meses + 1)

plt.figure(figsize=(14, 6))
lineas = []
etiquetas = []
simulacion_resultados = []

for idx, row in df_valid.iterrows():
    D_i = row["D_i"]
    Q_i = row["Q_i"]
    nombre = str(row["Detalle"])

    if not nombre or pd.isna(nombre):
        continue

    frecuencia_i = max(1, int(np.floor(Q_i / D_i)))

    inventario = [Q_i] # inventario inicial
    for t in range(1, len(tiempo)):
        I_t = inventario[-1] - D_i
        if t % frecuencia_i == 0:
            I_t += Q_i
        inventario.append(I_t)

    simulacion_resultados.append({"Producto": nombre, **{f"Mes {i}": inv for i, inv in enumerate(inventario)}})
    linea, = plt.plot(tiempo, inventario, label=nombre)
    lineas.append(linea)
    etiquetas.append(nombre)

# Graficar resultados
title = "Escenario 2: Simulación con Frecuencia de Reabastecimiento Adaptativa ({} meses)".format(simulacion_meses)
plt.title(title)
plt.xlabel("Mes")
plt.ylabel("Nivel de Inventario")
plt.axhline(0, color='gray', linestyle='--', linewidth=0.8)
plt.grid(True)
plt.legend(lineas, etiquetas, bbox_to_anchor=(1.05, 1), loc='upper left', fontsize=7)
plt.tight_layout()
plt.show()

# Mostrar resultados como tabla completa
df_simulacion = pd.DataFrame(simulacion_resultados)
print("\nResultados completos de la simulación de inventario (Escenario 2):")
display(df_simulacion)

```

**Figura 12:** Código Python del modelo matemático en Escenario 2

**Elaborado por: Autores**

Finalmente, para el escenario 3, se consideró una demanda aleatoria. En la Figura 13 se muestra el código Python utilizado para modelar el modelo matemático para el escenario 3.

```

# Simulación con demanda aleatoria
tiempo = np.arange(simulacion_meses + 1)

fig1, ax1 = plt.subplots(figsize=(20, 10))
lineas = []
etiquetas = []
simulacion_resultados = []
kpis_resultados = []

for idx, row in df_valid.iterrows():
    D_i = row["D_i"]
    Q_i = row["Q_i"]
    h_i = row["h_i"]
    unit_cost = row["unit_cost"]
    nombre = str(row["Detalle"])

    if not nombre or pd.isna(nombre):
        continue

    frecuencia_i = max(1, int(np.floor(Q_i / D_i)))
    demanda_mes = np.random.normal(loc=D_i, scale=0.2 * D_i, size=simulacion_meses)
    demanda_mes = np.maximum(demanda_mes, 0) # evitar demanda negativa

    inventario = [Q_i]
    for t in range(simulacion_meses):
        I_t = inventario[-1] - demanda_mes[t]
        if (t + 1) % frecuencia_i == 0:
            I_t += Q_i
        inventario.append(I_t)

    inv_array = np.array(inventario)
    quiebres = np.sum(inv_array < 0)
    porcentaje_quiebre = 100 * quiebres / len(inv_array)
    inventario_promedio = np.mean(inv_array)
    num_pedidos = simulacion_meses // frecuencia_i
    costo_total = (num_pedidos * K) + (inventario_promedio * h_i * simulacion_meses / 12)

    simulacion_resultados.append({"Producto": nombre, **{"#Meses {i}": inv for i, inv in enumerate(inventario)}})
    kpis_resultados.append({
        "Producto": nombre,
        "% Quiebre": round(porcentaje_quiebre, 2),
        "Inventario Promedio": round(inventario_promedio, 2),
        "Costo Total Estimado ($)": round(costo_total, 2)
    })

    linea, = ax1.plot(tiempo, inventario, label=nombre)
    lineas.append(linea)
    etiquetas.append(nombre)

ax1.set_title("Escenario 3: Simulación con Demanda Aleatoria ({} meses)".format(simulacion_meses))
ax1.set_xlabel("Mes")
ax1.set_ylabel("Nivel de Inventario")
ax1.axhline(0, color='gray', linestyle='--', linewidth=0.8)
ax1.grid(True)
ax1.legend(lineas, etiquetas, bbox_to_anchor=(1.05, 1), loc='upper left', fontsize=7)
fig1.tight_layout(rect=[0, 0, 0.75, 1])
plt.show()

```

**Figura 13:** Código Python del modelo matemático en Escenario 3

**Elaborado por: Autores**

### 3.8.5. Validación del Modelo mediante Método Delphi.

**Método Delphi:** Landeta (2021) indica que el método Delphi es una técnica que se utiliza para levantar información de manera estructurada y permite hacer análisis de información de la opinión de los expertos en relación a un tema en específico. Este método busca llegar a un consenso de varios expertos por medio de su retroalimentación de forma controlada, anónima y sistemática.

En relación a la validación de instrumentos de medición, el Método Delphi se ha convertido en una estrategia eficiente para medir la validez de contenido, de esta forma los expertos valoran a pertinencia, claridad y coherencia.

Pérez (2022) menciona que el Método Delphi es útil especialmente cuando se realizan instrumentos nuevos o se ajustan a nuevos contextos, de esta manera se garantiza la calidad conceptual.

López (2024) menciona que el procedimiento para la aplicación del Método Delphi va desde la selección de los expertos que participarán de un panel, el diseño y aplicación de rondas de cuestionarios, análisis estadístico de la información levantada, retroalimentación a los expertos y se repite el proceso hasta llegar a un consenso que sea aceptable.

De esta forma se considera que el Método Delphi es una herramienta valiosa y actualizada que permite validar modelos o instrumentos, especialmente en áreas donde la opinión de los expertos es importante.

**Aplicación del Método Delphi:** Para la aplicación del Método Delphi en la presente investigación se seleccionaron dos expertos en logística aeronáutica mismos que cuentan con experiencia en gestión de inventarios de partes y repuestos en el ámbito aeronáutico. Los expertos seleccionados son:

**Experto 1:** Oficial logístico de la Fuerza Aérea Ecuatoriana con experiencia en logística aeronáutica y mantenimiento de aeronaves, de profesión Ingeniero en Electrónica e Instrumental y Magister en Educación, jefe del Escuadrón de Mantenimiento de Sistemas Aeronáuticos ESMA.

**Experto 2:** Oficial logístico de la Fuerza Aérea Ecuatoriana con 20 años de experiencia en logística aeronáutica, mantenimiento de aeronaves, I+D+i, de profesión Ingeniero Mecánico, Magíster en Educación, Magíster en Ingeniería Aeronáutica, Magíster en Ingeniería mención Sistemas de calidad y productividad, cuenta con 10 años de experiencia en el ámbito de gestión de inventarios y logística, en el ámbito laboral se ha desempeñado en el aspecto

académico, investigación y en el sector público, ha trabajado directamente con sistemas de gestión de inventarios de partes y repuestos, por lo que cuenta con experiencia en sistemas de mantenimiento o gestión de repuestos.

Los expertos que colaboraron en la validación del modelo matemático tuvieron el apoyo de un cuestionario para poder realizar sus observaciones, el mismo que se muestra en el Anexo 11.

**Análisis:** Según la información recabada de los expertos, las mismas que se muestran en el Anexo 12 se puede analizar lo siguiente.

Una vez aplicado el Método Delphi para la validación del modelo matemático realizada por los expertos se puede mencionar en base a sus recomendaciones que el modelo reúne las características necesarias para el área en que se desenvuelve que es la logística aeronáutica bajo un criterio estándar, sin embargo, en entornos con mucha diversificación de flota. Es así que en muchos casos se requiere considerar el aspecto de la poca uniformidad de la flota y cómo impacta en el modelo.

Por otro lado, de acuerdo a uno de los expertos el modelo matemático de gestión de inventarios al ser validado en contextos

reales es necesario que se considere algunas situaciones de interés donde la flota no es uniforme, tal es el caso de la aviación militar. Es por este motivo que para cada tipo de aeronave se puede requerir distintos repuestos, frecuencias de mantenimiento y tiempos de entrega. Debido a esto para ampliar la aplicabilidad se sugiere adaptar el modelo a esta realidad permitiendo identificar mejor las necesidades logísticas específicas y tomar decisiones más acertadas en cuanto a niveles de stock y planificación de reabastecimiento.

Finalmente, de acuerdo a los criterios emitidos por los dos expertos que fueron muy concluyentes se puede confirmar que el modelo fue validado de manera satisfactoria puesto que obtuvo la máxima puntuación en cada uno de los criterios.

## CAPÍTULO IV ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS

### 4.1. Análisis de los Resultados

Una vez determinado el modelo matemático propuesto, el mismo que fue detallado en la Ecuación # 22, se realizaron varias simulaciones utilizando Python y se analizaron sus resultados. La Figura 14 muestra la simulación realizada bajo los supuestos de un tiempo de 24 meses y el reabastecimiento  $T_r$  es de 3 meses y se consideran los valores estimados para  $D_i$  y  $Q_i$ .

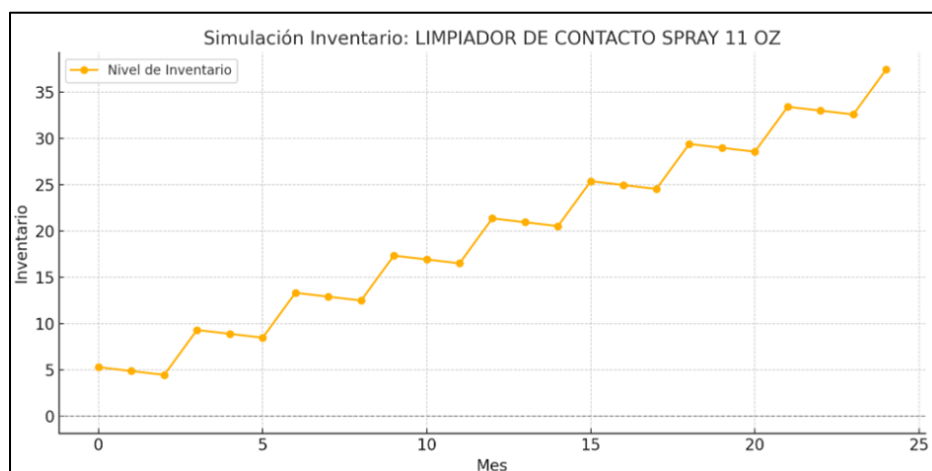


**Figura 14:** Simulación del Inventario para un ítem

**Elaborado por: Autores**

Al realizar la simulación se consideró el ítem limpiador de contacto spray 11 oz en donde se puede observar la pendiente

positiva entre los meses la misma que refleja el consumo constante  $D_i$ , e indica que cada 3 meses se debe reponer el inventario considerando  $Q_i$ , además se puede observar el ciclo clásico de un Modelo EOQ.

En la Figura 15 se puede observar la simulación realizada con todos los ítems bajo los supuestos de un tiempo de 24 meses, con reabastecimientos cada 3 meses. Esta figura muestra que cada línea indica el comportamiento del inventario de los ítems, considerando que algunos tienen caídas más pronunciadas, puesto que reflejan mayor demanda a diferencia de otros que son más estables, y también se puede notar que todos los ítems presentan el ciclo clásico del Modelo EOQ.

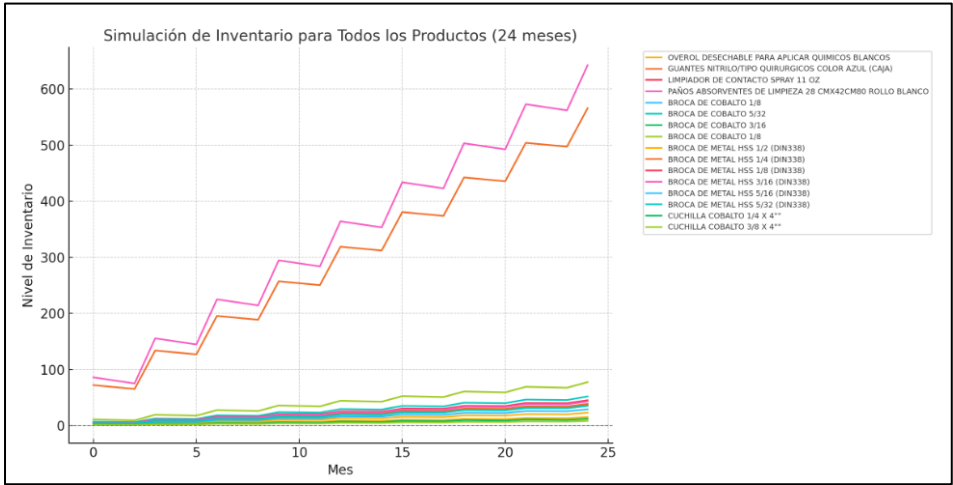


**Figura 15:** Simulación de inventario con todos los ítems

**Elaborado por: Autores**

#### **4.1.1. Simulación Escenario 1 Demanda Constante.**

El escenario 1 permite simular el inventario con todos los ítems que conforman la muestra utilizando el modelo matemático propuesto. Con el código en Python se logrará cargar los datos de la muestra, se calcula los valores de  $D_i$ ,  $h_i$  y  $Q_i$  por ítem, además se simulará bajo los siguientes supuestos.

##### **Supuestos:**

- $T = 12$  meses de análisis
- $K = 50$  costo por orden (supuesto)
- $\alpha = 0.25$  Porcentaje de mantenimiento anual sobre el valor
- $\text{simulacion\_meses} = 24$
- $\text{reabastecimiento\_cada} = 3$

**Análisis:** El escenario 1 fue considerado como un caso base de formal real y generalizado, puesto que sus parámetros permiten ilustrar el comportamiento del sistema de gestión sin sobre ajustarse en casos específicos.

El horizonte de análisis que se consideró es de un año, es decir,  $T = 12$  puesto que los datos provienen de un total anual, y además en el campo de la logística analizar la demanda anual y convertirla en mensual es una práctica muy común puesto que es parte de la planeación táctica.

Considerar el costo de ordenar,  $K=50$ , es una estimación estándar puesto que en situaciones reales hacer un pedido tiene un costo que oscila entre \$30 y \$100. Dado el objetivo que es optimizar costos, se consideró un punto medio.

El costo de mantenimiento se consideró como una tasa estándar de 25% puesto que responde a las normas comunes en modelos EOQ que están entre el 20% y 30% del valor unitario.

El tiempo de reabastecimiento se consideró de forma trimestral, dado que es común en la gestión de inventarios realizar una revisión periódica y no diaria. Además, se considera un buen punto de referencia medio entre el stock que se dispone y el no hacer pedido muy seguidos.

Se consideró un tiempo de 24 meses para la simulación para poder observar la evolución del sistema más allá del ciclo anual que es común. Permitiendo así detectar tendencias como agotamiento, exceso o comportamiento cíclico.

En la Figura 16 se puede observar una gráfica que muestra la evolución del inventario para cada ítem.

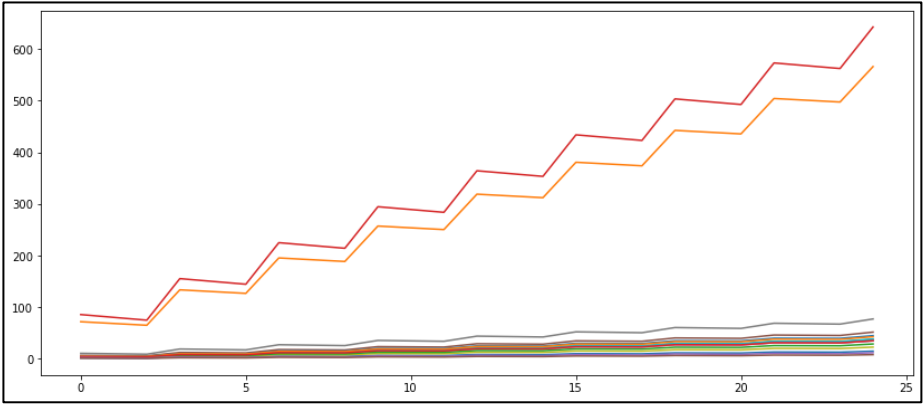


**Figura 16:** Simulación Escenario 1

**Elaborado por: Autores**

Por otro parte, en la Figura 17 se muestran Resultados completos de la simulación de inventario en el Escenario 1 exportados a Excel.

|      |                                                                                                                                                                          | Resultados completos de la simulación de inventario en el Escenario 1 |            |            |             |             |             |             |             |             |       |             |             |             |             |             |             |             |             |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Item |                                                                                                                                                                          | Mes 0                                                                 | Mes 1      | Mes 2      | Mes 3       | Mes 4       | Mes 5       | Mes 6       | Mes 7       | Mes 8       | Mes 9 | Mes 10      | Mes 11      | Mes 12      | Mes 13      | Mes 14      | Mes 15      | Mes 16      | Mes 17      |
| 0    | OVEROL<br>DESECHABLE<br>PAPA APACAR<br>QUIMICOS<br>BLANCOS<br>CUARNES<br>NITROLOPITO<br>GUMIFICADOS<br>COLORAZUL<br>E-<br>LIMPADOR DE<br>CONTACTO<br>SPRAY 100<br>PANDOS | 2 111 709                                                             | 1 945 041  | 1 778 374  | 3 723 415   | 3 556 748   | 3 390 082   | 5 335 123   | 5 369 456   | 5 001 769   | ...   | 10 170 245  | 10 003 579  | 9 836 932   | 11 781 953  | 13 615 286  | 11 448 620  | 13 393 660  | 13 226 594  |
| 1    | 1                                                                                                                                                                        | 71 937 027                                                            | 68 560 361 | 65 143 634 | 133 704 054 | 130 287 388 | 126 870 721 | 195 431 082 | 192 094 415 | 188 597 748 | ...   | 380 612 163 | 377 105 437 | 373 778 830 | 442 333 190 | 438 922 524 | 435 505 857 | 504 066 218 | 500 643 951 |
| 2    | 2                                                                                                                                                                        | 5 270 463                                                             | 4 853 736  | 4 437 123  | 5 290 326   | 8 874 259   | 8 457 532   | 13 371 368  | 12 894 722  | 12 478 055  | ...   | 25 372 777  | 24 956 110  | 24 539 443  | 29 393 239  | 28 976 573  | 28 559 906  | 33 413 702  | 32 997 035  |
| 3    | 3                                                                                                                                                                        | 85 628 215                                                            | 80 411 540 | 74 394 082 | 155 406 430 | 149 969 764 | 144 573 097 | 224 384 645 | 219 567 979 | 214 151 312 | ...   | 433 719 231 | 428 302 624 | 422 885 957 | 503 297 506 | 497 880 839 | 492 464 172 | 572 875 721 | 567 459 054 |
| 4    | 4                                                                                                                                                                        | 4 345 773                                                             | 4 173 306  | 4 012 439  | 8 191 546   | 8 024 879   | 7 858 212   | 12 037 318  | 11 870 852  | 11 703 385  | ...   | 23 574 637  | 23 407 970  | 23 241 303  | 27 420 410  | 27 253 743  | 27 087 076  | 31 266 162  | 31 099 516  |
| 5    | 5                                                                                                                                                                        | 6 871 270                                                             | 6 454 603  | 6 037 937  | 12 432 540  | 12 075 874  | 11 653 207  | 18 113 810  | 17 697 144  | 17 280 477  | ...   | 34 977 621  | 34 560 954  | 34 144 287  | 40 536 891  | 40 182 224  | 39 765 558  | 46 220 161  | 45 803 494  |
| 6    | 6                                                                                                                                                                        | 4 345 773                                                             | 4 173 306  | 4 012 439  | 8 191 546   | 8 024 879   | 7 858 212   | 12 037 318  | 11 870 852  | 11 703 385  | ...   | 23 574 637  | 23 407 970  | 23 241 303  | 27 420 410  | 27 253 743  | 27 087 076  | 31 266 162  | 31 099 516  |
| 7    | 7                                                                                                                                                                        | 10 814 761                                                            | 9 981 429  | 9 148 095  | 19 123 523  | 18 296 189  | 17 462 856  | 27 444 204  | 26 810 351  | 25 777 618  | ...   | 52 388 568  | 51 555 235  | 50 721 902  | 60 703 330  | 59 869 997  | 59 036 663  | 69 018 091  | 68 184 758  |
| 8    | 8                                                                                                                                                                        | 2 981 424                                                             | 2 814 757  | 2 648 091  | 5 482 848   | 5 296 181   | 5 129 515   | 7 944 272   | 7 777 605   | 7 610 339   | ...   | 15 388 544  | 15 221 877  | 15 055 210  | 17 869 968  | 17 703 301  | 17 536 634  | 20 351 392  | 20 184 725  |
| 9    | 9                                                                                                                                                                        | 4 729 838                                                             | 4 563 171  | 4 396 504  | 8 959 675   | 8 793 003   | 8 626 342   | 13 189 513  | 13 022 846  | 12 856 180  | ...   | 25 873 026  | 25 712 360  | 25 545 693  | 30 100 864  | 29 942 197  | 29 775 531  | 34 338 702  | 34 172 035  |
| 10   | 10                                                                                                                                                                       | 5 443 311                                                             | 5 276 644  | 5 109 977  | 10 386 621  | 10 219 354  | 10 052 288  | 15 328 932  | 15 163 265  | 14 996 598  | ...   | 30 153 863  | 29 993 197  | 29 832 530  | 35 823 174  | 34 396 507  | 34 769 840  | 40 046 484  | 39 879 818  |
| 11   | 11                                                                                                                                                                       | 5 216 405                                                             | 5 049 739  | 4 883 072  | 9 932 811   | 9 766 144   | 9 599 477   | 14 649 216  | 14 482 549  | 14 315 883  | ...   | 28 798 432  | 28 631 765  | 28 465 099  | 33 534 837  | 33 348 171  | 33 161 504  | 38 231 242  | 38 064 576  |
| 12   | 12                                                                                                                                                                       | 3 658 809                                                             | 3 432 142  | 3 325 475  | 6 817 617   | 6 650 351   | 6 484 284   | 9 976 428   | 9 809 759   | 9 643 093   | ...   | 19 452 852  | 19 286 185  | 19 119 519  | 22 611 661  | 22 444 394  | 22 278 327  | 25 770 469  | 25 603 803  |
| 13   | 13                                                                                                                                                                       | 4 364 358                                                             | 4 197 691  | 4 031 024  | 8 228 716   | 8 062 049   | 7 895 382   | 12 093 073  | 11 926 407  | 11 759 740  | ...   | 23 686 147  | 23 519 480  | 23 352 813  | 27 550 505  | 27 383 838  | 27 217 171  | 31 414 862  | 31 248 196  |
| 14   | 14                                                                                                                                                                       | 2 439 750                                                             | 2 023 084  | 1 606 417  | 3 629 500   | 3 212 834   | 2 796 167   | 4 819 251   | 4 402 584   | 3 985 917   | ...   | 8 368 501   | 7 971 834   | 7 565 168   | 9 578 251   | 9 161 585   | 8 744 918   | 10 768 001  | 10 351 335  |
| 15   | 15                                                                                                                                                                       | 1 360 828                                                             | 1 194 161  | 1 027 494  | 2 221 655   | 2 054 389   | 1 888 322   | 3 082 483   | 2 915 816   | 2 749 150   | ...   | 5 664 366   | 5 438 239   | 5 212 132   | 6 525 793   | 6 359 127   | 6 192 460   | 7 386 621   | 7 219 354   |
|      |                                                                                                                                                                          |                                                                       |            |            |             |             |             |             |             |             |       |             |             |             |             |             |             |             |             |

**Figura 17:** Resultados completos de la simulación de inventario en el Escenario 1 exportados a Excel

**Elaborado por: Autores**

Los resultados mostrados en la simulación del escenario 1 permiten observar que la mayor parte de los ítems muestra un comportamiento cíclico puesto que bajan mes a mes y suben cada 3 meses que es el reabastecimiento. Al observar este patrón se puede determinar que el modelo aplica de manera correcta el EOQ como cantidad de reabastecimiento y lo hace cada tres meses.

En algunos ítems se puede observar una demanda mensual alta que el reabastecimiento cada 3 meses no alcanza para cubrir el consumo acumulado. De esta manera se generan rupturas en el stock que llevan a un inventario negativo que llevado a la práctica esto repercute en posibles mantenimientos incumplidos y también evidencia la necesidad de reajustar la política de reabastecimiento.

Por otra parte, las cantidades EOQ permiten mantener un patrón de inventario estable para la mayor cantidad de ítems considerando una frecuencia de pedido adecuada. Sin embargo, el

modelo que se aplicó no adapta  $Q_i$  de manera dinámica si cambia la demanda o el tiempo de reabastecimiento.

**Estrategias:** Con el modelo matemático simulado que está basado en los supuestos del escenario 1, considerando un reabastecimiento cada 3 meses. Se puede establecer como estrategia a partir de los resultados obtenidos lo siguiente.

Se personaliza el período de reabastecimiento dependiendo el comportamiento de cada ítem, de tal manera, se debe considerar que los productos de alta rotación o de bajo costo de mantenimiento se deben reabastecer con más frecuencia, sin embargo, los ítems con costo mayor o de baja demanda se deben reabastecer con menos frecuencia.

Se puede observar que algunos ítems muestran inventarios negativos en la simulación para lo cual se debe detectar aquellos ítems y ajustar la frecuencia de reabastecimiento y la demanda esperada  $D_i$  en el caso que haya crecimiento.

## Resumen de criterios claves con el escenario

**1:** Con los resultados obtenidos se puede resumir en la siguiente Tabla 11 los criterios claves considerados bajo el escenario 1.

**Tabla 11:** Resumen de criterios claves Escenario 1

| Criterio evaluado            | Resultado observado                                                      | Estrategia sugerida                                                                                          |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dinámica del inventario      | Cíclico, controlado, pero no ideal para todos los ítems                  | Ajuste en la frecuencia dependiendo el tipo de ítem                                                          |
| Inventario negativo          | Se ha detectado en varios ítems                                          | Se debe priorizar estos ítems y reajustar la política vigente.                                               |
| EOQ y demanda real           | En muchos de los casos resulta eficiente, pero a la vez no es suficiente | Determinar un reabastecimiento que se adapte más a los ítems                                                 |
| Variabilidad entre productos | Por la rotación y valor unitario es alta                                 | Se deben implementar políticas de gestión de inventarios basadas en el modelo ABC o considerando la rotación |

**Elaborado por: Autores**

### 4.1.2. Simulación Escenario 2 Horizonte Extendido

En este escenario se toma como objetivo disminuir los quiebres del stock que fueron identificados en el escenario 1, mediante un ajuste en la frecuencia del reabastecimiento considerando la demanda mensual de cada ítem.

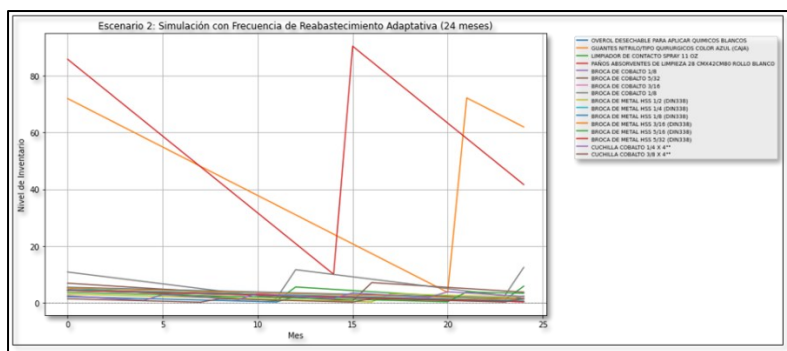


**Figura 18:** Resultados completos de la simulación de inventario (Escenario 2)

**Elaborado por: Autores**

| Resultados completos de la simulación de inventario en el Escenario 2 |            |            |            |            |            |            |            |            |            |     |            |            |            |            |           |            |            |            |            |            |          |  |  |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|--|--|
| Producto                                                              | Mes 0      | Mes 1      | Mes 2      | Mes 3      | Mes 4      | Mes 5      | Mes 6      | Mes 7      | Mes 8      | ... | Mes 15     | Mes 16     | Mes 17     | Mes 18     | Mes 19    | Mes 20     | Mes 21     | Mes 22     | Mes 23     | Mes 24     |          |  |  |
| 0 OVEROL DECORABLE PARA MUJERES QUINCOS BLANCOS GUANTES               | 2.11708    | 1.545.041  | 1.770.374  | 1.611.708  | 1.445.041  | 1.278.374  | 1.111.708  | 0.945041   | 0.778374   | ... | 1.723.415  | 1.556.748  | 1.390.082  | 1.223.415  | 1.056.748 | 0.890082   | 0.723415   | 0.556748   | 0.390082   | 0.223415   | 0.056748 |  |  |
| 1 METALOTIPO GUAPELUCOS COLOR AZUL 4"                                 | 71.977.027 | 68.560.361 | 65.143.694 | 61.727.027 | 58.310.361 | 54.893.694 | 51.477.027 | 48.060.361 | 44.643.694 | ... | 20.727.027 | 17.310.361 | 13.893.694 | 10.477.027 | 7.060.361 | 3.643.694  | 72.204.054 | 68.787.388 | 65.370.721 | 61.954.054 |          |  |  |
| 2 LAMPAROTE COBAYATO SPRAY 1102                                       | 5.270.463  | 4.863.796  | 4.437.129  | 4.020.463  | 3.603.796  | 3.187.129  | 2.770.463  | 2.353.796  | 1.937.129  | ... | 4.290.526  | 3.874.259  | 3.457.592  | 3.040.526  | 2.624.259 | 2.207.592  | 1.790.326  | 1.374.259  | 0.957592   | 5.811.968  |          |  |  |
| 3 PÁDRO ABSORBENTES DE LAMPREZA 28 C/CAJONES 10L                      | 85.626.275 | 80.411.549 | 74.904.062 | 69.370.275 | 64.161.549 | 58.744.062 | 53.326.275 | 47.891.549 | 42.464.062 | ... | 30.456.430 | 24.943.764 | 19.531.077 | 14.116.430 | 8.702.764 | 63.323.097 | 57.906.430 | 52.489.764 | 47.073.097 | 41.656.430 |          |  |  |
| 4 BROCADE COBAL 1015                                                  | 4.345.773  | 4.175.106  | 4.012.439  | 3.845.773  | 3.675.106  | 3.512.439  | 3.345.773  | 3.175.106  | 3.012.439  | ... | 1.845.773  | 1.675.106  | 1.512.439  | 1.345.773  | 1.175.106 | 1.012.439  | 0.845773   | 0.675106   | 0.512439   | 0.345773   |          |  |  |
| 5 BROCADE COBAL 1015                                                  | 6.817.210  | 6.454.603  | 6.037.337  | 5.621.210  | 5.204.603  | 4.787.337  | 4.371.210  | 3.954.603  | 3.537.337  | ... | 0.821.270  | 0.715.874  | 0.609.207  | 0.242.540  | 0.525.874 | 0.419.207  | 4.932.540  | 4.515.874  | 4.103.207  | 3.742.540  |          |  |  |
| 6 BROCADE COBAL 1015                                                  | 4.345.773  | 4.175.106  | 4.012.439  | 3.845.773  | 3.675.106  | 3.512.439  | 3.345.773  | 3.175.106  | 3.012.439  | ... | 1.845.773  | 1.675.106  | 1.512.439  | 1.345.773  | 1.175.106 | 1.012.439  | 0.845773   | 0.675106   | 0.512439   | 0.345773   |          |  |  |
| 7 BROCADE COBAL 1015                                                  | 10.094.761 | 3.961.429  | 3.940.095  | 0.314.761  | 7.401.429  | 6.640.095  | 0.504.761  | 4.901.429  | 4.140.095  | ... | 0.323.522  | 0.296.193  | 7.402.056  | 6.623.522  | 5.796.193 | 4.962.056  | 4.123.522  | 3.296.193  | 2.462.056  | 16.444.204 |          |  |  |
| 8 METAL HDS 1015 D/CR38                                               | 2.961.424  | 2.814.757  | 2.646.091  | 2.481.424  | 2.314.757  | 2.146.091  | 1.981.424  | 1.814.757  | 1.646.091  | ... | 0.401424   | 0.374573   | 3.523.515  | 2.962.460  | 2.796.311 | 2.623.515  | 2.452.460  | 2.286.311  | 2.123.515  | 1.962.460  |          |  |  |
| 9 METAL HDS 1015 D/CR38                                               | 4.729.638  | 4.563.771  | 4.396.904  | 4.229.638  | 4.063.771  | 3.896.904  | 3.729.638  | 3.563.771  | 3.396.904  | ... | 2.223.830  | 2.060.771  | 1.896.504  | 1.729.638  | 1.563.771 | 1.396.904  | 1.229.638  | 1.063.771  | 0.896904   | 0.729638   |          |  |  |
| 10 METAL HDS 1015 D/CR38                                              | 5.443.311  | 5.276.644  | 5.109.977  | 4.943.311  | 4.776.644  | 4.609.977  | 4.443.311  | 4.276.644  | 4.109.977  | ... | 2.943.311  | 2.776.644  | 2.609.977  | 2.443.311  | 2.276.644 | 2.109.977  | 1.943.311  | 1.776.644  | 1.609.977  | 1.443.311  |          |  |  |
| 11 BROCADE COBAL 1015 D/CR38                                          | 5.216.405  | 5.043.738  | 4.883.072  | 4.716.405  | 4.543.738  | 4.383.072  | 4.216.405  | 4.043.738  | 3.883.072  | ... | 2.716.405  | 2.543.738  | 2.383.072  | 2.216.405  | 2.043.738 | 1.883.072  | 1.716.405  | 1.543.738  | 1.383.072  | 1.216.405  |          |  |  |
| 12 METAL HDS 1015 D/CR38                                              | 3.058.809  | 3.432.142  | 3.325.475  | 3.218.809  | 2.952.142  | 2.825.475  | 2.698.809  | 2.432.142  | 2.325.475  | ... | 1.958.809  | 0.952462   | 0.025475   | 0.650009   | 0.430242  | 0.325475   | 3.017.017  | 3.050.361  | 3.404.204  | 3.317.017  |          |  |  |
| 13 METAL HDS 1015 D/CR38                                              | 4.364.358  | 4.197.691  | 4.031.024  | 3.864.358  | 3.697.691  | 3.531.024  | 3.364.358  | 3.197.691  | 3.031.024  | ... | 1.884.358  | 1.697.691  | 1.511.024  | 1.364.358  | 1.197.691 | 1.031.024  | 0.894358   | 0.676911   | 0.510024   | 0.364358   |          |  |  |
| 14 BROCADE COBAL 1015 D/CR38                                          | 2.433.750  | 2.023.094  | 1.608.417  | 1.189.750  | 0.773094   | 2.766.750  | 2.375.500  | 1.962.834  | 1.546.750  | ... | 3.500.091  | 3.032.334  | 2.675.667  | 2.259.031  | 1.842.334 | 3.605.416  | 3.440.751  | 3.032.094  | 2.615.416  | 2.193.751  |          |  |  |
| 15 COBAL COBAL 30X3                                                   | 1.360.828  | 1.194.161  | 1.027.494  | 0.860603   | 0.694161   | 0.527494   | 0.360603   | 0.194161   | 1.360.322  | ... | 0.216595   | 1.416.898  | 1.243.194  | 1.062.483  | 0.893986  | 0.743950   | 0.592483   | 0.445896   | 0.294900   | 1.443.194  |          |  |  |

**Figura 19:** Resultados completos de la simulación de inventario en el Escenario 2 exportados a Excel

**Elaborado por: Autores**

**Análisis:** De los resultados obtenidos con la simulación del escenario 2, se puede establecer que cada ítem tiene un reabastecimiento que se ajusta en función al tiempo que dura cada ítem en stock, de esta manera los ítems de alta rotación se reabastecen con mayor frecuencia. La ventaja en este sentido es que el reabastecimiento se adapta a la dinámica de cada ítem.

En relación al escenario 1, hay muchos ítems que ya no presentan niveles de inventario negativos, considerando que al tener una política de reabastecimiento que se adapta a la dinámica de cada ítem ayuda a mejorar la cobertura de la demanda. Sin embargo, todavía pueden existir casos con quiebres si se considera que la frecuencia calculada no se relaciona con las variaciones del consumo.

Se puede observar una mejora en la estabilidad de los niveles de inventario, evitando un sobre stock y se observa además una oscilación suave que está

relacionada con los ciclos de consumo y la eficiencia de los reabastecimientos.

Sin embargo, se debe considerar que cuando los ítems tienen baja demanda el reabastecimiento sigue siendo de varios meses, con esto se logra una reducción de los costos que son innecesarios en el reabastecimiento y además mantienen un inventario bajo que no tiene riesgos de quiebre.

El sistema EOQ que está combinado con un reabastecimiento personalizado en cada ítem permite obtener un mejor equilibrio en relación a los costos y la disponibilidad del stock del inventario.

**Estrategias:** Partiendo de los resultados obtenidos en la simulación con el escenario 2, en donde se consideró un reabastecimiento adaptado a cada ítem, se pueden establecer las siguientes estrategias que en la práctica ayudan a mejorar la gestión de inventarios.

Al observar que el comportamiento del inventario mejora considerando una frecuencia de

reabastecimiento según la demanda del EOQ se establece como estrategia aplicar frecuencias para cada ítem, por tal motivo, este cálculo debe ser automatizado en el software de inventarios. Teniendo como beneficio la disminución de quiebres que no incurrirá en sobre costos de almacenamiento.

Al observar que los ítems tienen un comportamiento por rotación se debe considerar clasificar a los ítems no solo por el valor (Método Análisis ABC) sino por la velocidad de consumo, siendo esta alta, media o baja. Para lo cual se deben definir políticas combinando métricas en donde se considere la clasificación de la siguiente manera:

A – Alta: realizar una revisión de manera continua y EOQ dinámico

B – Media: establecer reabastecimiento adaptado por ítem

C – Baja: se debe realizar pedido bajo demanda o revisión periódica

Aunque el modelo propuesto y simulado con los parámetros del escenario 2 reduce los quiebres, algunos ítems siguen mostrando momentos en que el inventario es negativo o bajo. Por lo que se debe implementar un stock de seguridad que es calculado en función de la variabilidad de la demanda o del tiempo de entrega. Además, se debe aplicar políticas tipo  $(s,Q)$  o  $(s, S)$  en donde se define un umbral mínimo para generar el pedido.

El modelo EOQ funciona de manera correcta con este escenario, sin embargo, suponer demanda constante puede no ser muy realista a largo plazo. Por lo que se debe recalcular el EOQ y la frecuencia de reabastecimiento por periodos, es decir, puede ser por trimestre o semestre con datos actualizados. Además, incorporar estacionalidad o proyección si están disponibles.

Con los resultados obtenidos se pueden implementar métricas de desempeño (KPIs) que sean un apoyo en la toma de decisiones, por ejemplo, se puede considerar el porcentaje (%) de

quiebres de stock por ítem, el inventario promedio, el tiempo promedio entre pedidos y el costo estimado de mantenimiento y pedidos.

Por otro lado, si un ítem simulado presenta de manera constante riesgo de quiebre se pueden automatizar de manera constante alertas preventivas, estas deben ser configuradas cuando el inventario caiga a cierto umbral y se debe priorizar el análisis de aquellos ítems para realizar los ajustes de las políticas o abastecimiento.

Finalmente, el escenario 2 nos muestra que considerar una frecuencia de reabastecimiento adaptada a cada ítem mejora de manera significativa la disponibilidad de los ítems. Considerando este resultado las estrategias se deben enfocar en: Personalización y segmentación, automatización de políticas del EOQ, implementar KPIs y alertas preventivas y realizar un ajuste dinámico basado con los datos actualizados.

### **Resumen de criterios claves con el escenario**

**2:** Con los resultados obtenidos se puede resumir en

la siguiente Tabla 12 los criterios claves considerados bajo el escenario 2:

**Tabla 12:** Resumen de criterios claves Escenario 2

| N° | Estrategia                             | Descripción                                                                                               | Beneficio                                       |
|----|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1  | Reabastecimiento diferenciado          | Personalizar la frecuencia por ítem considerando EOQ y demanda                                            | Disminución de quiebres sin generar sobre stock |
| 2  | Segmentación ABC por la rotación       | Clasificar el inventario basado en el valor y la velocidad de consumo para establecer políticas adecuadas | Eficiencia en las políticas de gestión          |
| 3  | Stock de seguridad para ítems críticos | Implementar niveles mínimos para aquellos ítems con comportamiento de riesgo de inventario negativo       | Evitar quiebres en ítems claves                 |
| 4  | EOQ dinámico con datos actualizados    | Recalculo del EOQ y el reabastecimiento cada tres meses con datos actualizados considerando               | Ajuste en los cambios en la demanda             |

|   |                                   |                                                                                                                                                            |                                                                    |
|---|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
|   |                                   | estacionalidad si esta aplica                                                                                                                              |                                                                    |
| 5 | Métricas de desempeño (KPIs)      | Implementación de % de quiebres de stock por ítem, el inventario promedio, el tiempo promedio entre pedidos y el costo estimado de mantenimiento y pedidos | Seguimiento continuo y apoyo en la toma de decisiones gerenciales  |
| 6 | Alertas preventivas automatizadas | Sistema que permita detectar las proyecciones de quiebre y muestre notificaciones o prevenga análisis.                                                     | Permite tomar acciones de manera temprana para prevenir problemas. |

**Elaborado por: Autores**

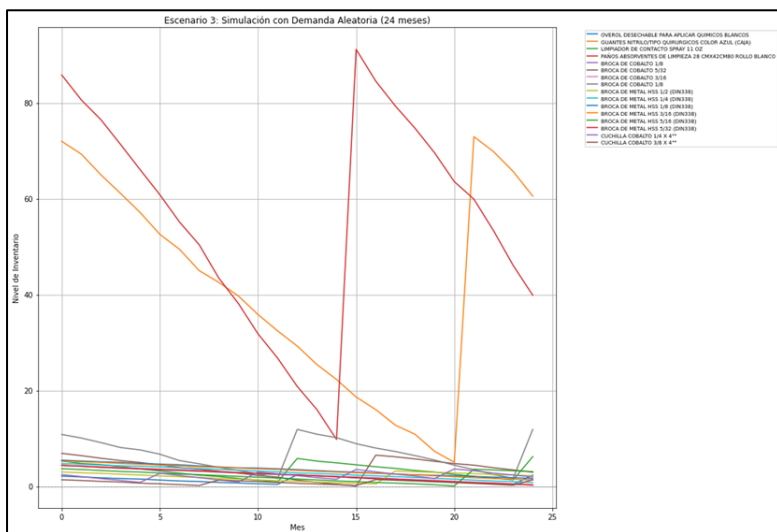
#### **4.1.3. Simulación Escenario 3 Demanda Aleatoria Realista.**

El escenario 3 responde a una Simulación con demanda aleatoria y se considera las siguientes características.

Es una simulación que se aproxima a la realidad porque incorpora la variabilidad en la demanda,

teniendo como parámetros los siguientes: El horizonte de simulación es de 24 meses, la demanda  $D_i$  de cada ítem se modela como una Distribución normal con media igual a la demanda histórica y una desviación estándar de 20% de la media. El reabastecimiento se considera según cada cuanto mes se realiza un nuevo pedido del inventario por ítem, logrando con esto una política de reabastecimiento personalizada lo cual es una ventaja del Modelo EOQ dinámico frente a otros enfoques estáticos. En cuanto a los costos considerados, el costo de hacer pedido es  $k = 50$  y el costo de mantenimiento es del 25% del costo unitario anual. Se considera que las variables evaluadas serán nivel de inventario mes a mes y los indicadores de desempeño KPIs.

Con este escenario se logra evaluar el desempeño del sistema de inventario bajo incertidumbre lo cual se apega más a la realidad. Ver Figura 20.



| Resultados completos de la simulación de inventario en el Escenario 3 |                                                                                                                       |            |            |            |            |            |            |            |            |            |        |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                                                                       | Producto                                                                                                              | Mes 0      | Mes 1      | Mes 2      | Mes 3      | Mes 4      | Mes 5      | Mes 6      | Mes 7      | Mes 8 ...  | Mes 10 | Mes 10     | Mes 17     | Mes 18     | Mes 19     | Mes 20     | Mes 21     | Mes 22     | Mes 23     | Mes 24     |            |
| 0                                                                     | OVEROL<br>DESECHABLE<br>PARA APLICAR<br>QUINTOS<br>BLANCOS<br>QUINTOS<br>METALOPRO<br>QUIMICOLOGOS<br>COLORADAL<br>IC | 2.111.706  | 1.953.949  | 1.769.15   | 1.606.968  | 1.501.947  | 1.299.823  | 1.170.222  | 0.999.073  | 0.800.619  | ...    | 1.753.593  | 1.553.664  | 1.478.280  | 1.236.945  | 1.046.704  | 0.894.973  | 0.741.890  | 0.619.700  | 0.390.350  | 2.339.070  |
|                                                                       | INTRALOTTO<br>QUIMICOLOGOS<br>COLORADAL<br>CONTACTO<br>SPRAY POC<br>RANGOS                                            | 71.977.027 | 69.303.636 | 64.362.740 | 61.939.779 | 57.108.006 | 52.571.622 | 49.460.422 | 45.011.195 | 42.957.413 | ...    | 18.632.762 | 15.997.310 | 12.752.662 | 10.658.639 | 7.272.263  | 5.031.027  | 32.956.229 | 69.832.039 | 65.684.483 | 60.545.434 |
| 1                                                                     | LIMPACORRAL<br>CONTACTO<br>SPRAY POC<br>RANGOS                                                                        | 5.279.463  | 4.752.630  | 4.539.054  | 4.169.817  | 3.613.726  | 3.190.058  | 2.738.473  | 2.312.516  | 2.040.718  | ...    | 4.482.171  | 4.079.184  | 3.725.497  | 3.297.903  | 2.961.539  | 2.473.673  | 2.071.640  | 1.697.979  | 1.336.425  | 6.197.630  |
|                                                                       | ARGUMENTOS<br>DE LIMPACORRAL<br>CONTACTO                                                                              | 85.628.275 | 80.618.718 | 76.485.960 | 71.324.547 | 66.032.696 | 60.842.429 | 55.148.019 | 50.421.480 | 43.470.324 | ...    | 91.176.740 | 84.546.713 | 79.348.212 | 74.713.816 | 69.565.361 | 63.582.463 | 59.912.521 | 53.334.376 | 46.091.361 | 39.846.155 |
| 4                                                                     | BROCAS<br>DE LIMPACORRAL<br>CONTACTO                                                                                  | 4.345.773  | 4.143.724  | 3.941.609  | 3.751.133  | 3.589.043  | 3.391.020  | 3.280.439  | 3.135.320  | 2.930.858  | ...    | 1.915.723  | 1.765.286  | 1.560.414  | 1.367.367  | 1.157.999  | 0.950.704  | 0.761.545  | 0.629.934  | 0.444.702  | 0.307.677  |
|                                                                       | BROCAS<br>DE LIMPACORRAL<br>CONTACTO                                                                                  | 6.871.270  | 6.392.064  | 5.843.883  | 5.367.563  | 4.960.304  | 4.468.887  | 3.907.223  | 3.564.358  | 3.122.213  | ...    | 0.059721   | 6.497.375  | 6.148.354  | 5.786.295  | 5.209.942  | 4.736.154  | 4.401.720  | 3.888.918  | 3.475.515  | 2.934.312  |
| 5                                                                     | BROCAS<br>DE LIMPACORRAL<br>CONTACTO                                                                                  | 4.345.773  | 4.206.655  | 4.085.677  | 3.906.861  | 3.727.230  | 3.574.734  | 3.442.645  | 3.250.954  | 3.036.936  | ...    | 1.863.188  | 1.732.063  | 1.549.873  | 1.382.302  | 1.241.649  | 1.043.704  | 0.850.131  | 0.724.938  | 0.526.291  | 0.334.140  |
|                                                                       | BROCAS<br>DE LIMPACORRAL<br>CONTACTO                                                                                  | 10.814.761 | 10.088.447 | 9.182.404  | 8.084.326  | 7.596.043  | 6.696.731  | 5.362.598  | 4.899.175  | 3.933.052  | ...    | 8.891.576  | 7.979.304  | 7.248.982  | 6.403.293  | 5.488.066  | 4.401.141  | 3.475.919  | 2.427.436  | 1.695.203  | 10.879.043 |
| 8                                                                     | BROCAS<br>DE LIMPACORRAL<br>CONTACTO                                                                                  | 2.911.424  | 2.811.524  | 2.693.577  | 2.518.506  | 2.350.768  | 2.195.509  | 1.996.231  | 1.847.495  | 1.651.660  | ...    | 0.61574    | 0.462190   | 3.103.019  | 3.038.390  | 2.913.777  | 2.778.952  | 2.643.394  | 2.442.966  | 2.360.392  | 2.168.274  |
|                                                                       | BROCAS<br>DE LIMPACORRAL<br>CONTACTO                                                                                  | 4.729.836  | 4.607.504  | 4.438.775  | 4.264.522  | 4.194.543  | 4.041.234  | 3.849.695  | 3.695.211  | 3.505.064  | ...    | 2.370.485  | 2.178.952  | 2.077.230  | 1.830.612  | 1.647.560  | 1.494.420  | 1.280.076  | 1.096.396  | 0.961712   | 0.809947   |
| 9                                                                     | BROCAS<br>DE LIMPACORRAL<br>CONTACTO                                                                                  | 5.443.311  | 5.279.063  | 5.110.064  | 4.936.472  | 4.767.462  | 4.629.208  | 4.404.044  | 4.246.622  | 4.046.363  | ...    | 2.937.471  | 2.751.904  | 2.560.693  | 2.476.246  | 2.294.361  | 2.160.481  | 2.033.662  | 1.933.966  | 1.765.075  | 1.633.341  |
|                                                                       | BROCAS<br>DE LIMPACORRAL<br>CONTACTO                                                                                  | 5.216.405  | 5.104.116  | 4.967.951  | 4.795.722  | 4.599.630  | 4.417.280  | 4.259.234  | 4.065.408  | 3.942.539  | ...    | 2.816.622  | 2.690.391  | 2.543.914  | 2.367.492  | 2.176.416  | 1.967.195  | 1.775.301  | 1.616.088  | 1.469.121  | 1.296.678  |
| 12                                                                    | BROCAS<br>DE LIMPACORRAL<br>CONTACTO                                                                                  | 3.658.809  | 3.500.623  | 3.290.402  | 3.062.188  | 2.864.451  | 2.795.916  | 2.546.324  | 2.425.339  | 2.251.007  | ...    | 0.976405   | 0.709619   | 0.859611   | 0.527811   | 0.320319   | 0.073662   | 3.593.093  | 3.402.405  | 3.237.428  | 3.053.464  |
|                                                                       | BROCAS<br>DE LIMPACORRAL<br>CONTACTO                                                                                  | 4.364.358  | 4.212.750  | 3.963.963  | 3.696.792  | 3.694.495  | 3.509.259  | 3.367.424  | 3.194.253  | 3.036.602  | ...    | 1.769.889  | 1.596.469  | 1.424.410  | 1.282.178  | 1.129.202  | 0.929993   | 0.764062   | 0.616400   | 0.422297   | 0.257237   |
| 13                                                                    | BROCAS<br>DE LIMPACORRAL<br>CONTACTO                                                                                  | 2.439.750  | 2.077.656  | 1.936.560  | 1.829.708  | 0.899996   | 2.715.446  | 2.245.971  | 1.800.252  | 1.330.285  | ...    | 3.910.099  | 3.015.788  | 2.527.063  | 2.131.322  | 1.625.077  | 3.011.229  | 3.234.300  | 2.743.676  | 2.341.951  | 1.946.772  |
|                                                                       | BROCAS<br>DE LIMPACORRAL<br>CONTACTO                                                                                  | 1.969.828  | 1.205.678  | 1.027.558  | 0.899978   | 0.854222   | 0.830649   | 0.854778   | 0.955538   | 1.317.651  | ...    | 0.769712   | 1.367.500  | 1.254.410  | 1.109.815  | 0.920306   | 0.786256   | 0.597766   | 0.476200   | 0.216047   | 1.371.718  |

**Figura 21:** Resultados completos de la simulación de inventario en el Escenario 3 exportados a Excel

**Elaborado por: Autores**

**Análisis:** En el escenario 3 se puede observar en la figura 20 como fluctúa el nivel de inventario mes a mes, esto debido a que esta simulación no considera una demanda constante sino aleatoria, con una desviación estándar sobre la media histórica del 20%. De esta manera se generan desvíos frecuentes respecto al inventario estimado que genera el Modelo EOQ.

En referencia al punto de quiebre algunos ítems presentan niveles altos de quiebre en el stock, esto debido a la variabilidad. Con esto se sugiere que el modelo actual puede resultar sensible a la incertidumbre y se pueden considerar el stock de seguridad y la revisión de frecuencias de reabastecimientos.

El inventario promedio tiende a ser más alto en ítems con mayor  $Q_i$  o mayor variabilidad. Sin embargo, hay unos ítems que tienen alto inventario que también presentan quiebres, por lo que esto sugiere una deficiencia en la política de reabastecimiento.

Por otra parte, en cuanto al costo estimado se puede observar que en ítems con frecuencias altas en pedido y un inventario promedio grande aportan más al costo total.

**Estrategias:** Con los resultados del escenario 3 se sugiere la necesidad de realizar un ajuste a la política actual de gestión de inventarios incluyendo un stock de seguridad o métodos más precisos de pronóstico para una reducción de los quiebres, ajustando de manera dinámica las frecuencias de pedidos y de esta manera clasificar los ítems según la criticidad para priorizarlos en la gestión. Por otro lado, es fundamental agregar pronósticos de demanda que tengan mayor precisión y hacer un análisis del equilibrio entre costos y nivel del servicio. Finalmente se sugiere considerar los tiempos de entrega para mejorar la planificación del reabastecimiento.

**Resumen de criterios claves con el escenario 3:** Con los resultados obtenidos se puede resumir en

la siguiente Tabla 13 los criterios claves considerados bajo el escenario 3:

**Tabla 13:** Resumen de criterios claves Escenario 3

| N° | Estrategia                                 | Descripción                                                      | Beneficio                                                       |
|----|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1  | Stock de seguridad                         | Aminorar los quiebres por variabilidad en la demanda             | Reducción del % de quiebre y mejora en el nivel de servicio     |
| 2  | Ajuste dinámico de la frecuencia de pedido | Mejora la sincronización entre el consumo y reabastecimiento     | Disminución de quiebres y optimización en los costos de pedidos |
| 3  | Clasificación por criticidad               | Priorizar los ítems para su gestión.                             | Mejora el enfoque estratégico en recursos y control             |
| 4  | Pronósticos en la demanda                  | Ayuda a anticipar el mejor comportamiento a futuro de la demanda | Mayor precisión en las decisiones sobre el inventario           |
| 5  | Análisis costo vs. Servicio                | Permite evaluar el impacto económico al mejorar el servicio      | Ayuda en la toma de decisiones entre costo y desempeño          |

|   |                           |                                                         |                                                                             |
|---|---------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 6 | Incluir tiempo de entrega | Permite anticipar quiebres durante el tiempo de entrega | Ayuda a realizar una planificación más real y robusta del reabastecimiento. |
|---|---------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|

**Elaborado por: Autores**

#### **4.1.4. Análisis Comparativo de los Escenarios de Simulación**

Una vez determinados los resultados se realiza un análisis comparativo entre los escenarios propuestos con la finalidad de identificar el más apropiado con la gestión de inventarios para partes y repuestos aeronáuticos.

**Comparación resultados Escenario 1 Vs. Escenario 2:** En relación al escenario 1, el escenario 2 se establece como se muestra en la tabla 14, en donde se pueden observar los criterios evaluados en el escenario 1 con el escenario 2.

**Tabla 14:** Escenario 1 Vs. Escenario 2

| Criterio evaluado                    | Escenario 1 | Escenario 2                                                            |
|--------------------------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------|
| Horizonte de análisis                | 12 meses    | 24 meses                                                               |
| Costo de orden – K                   | 50          | 50                                                                     |
| Costo por mantenimiento ( $\alpha$ ) | 0.25        | 0.25                                                                   |
| Plazo de la simulación               | 24 meses    | 24 meses                                                               |
| T. de reabastecimiento               | 3 meses     | Varía dependiendo de la demanda, para demanda alta será más frecuente. |

**Elaborado por: Autores**

En la Tabla 15 muestra un resumen que compara los principales resultados obtenidos en los escenarios 1 y 2.

**Tabla 15:** Comparación resultados Escenario 1 Vs. Escenario 2

| Criterio evaluado      | Escenario 1 | Escenario 2                            |
|------------------------|-------------|----------------------------------------|
| Quiebres de inventario | Frecuentes  | Se muestra una reducción significativa |
| Adaptabilidad por ítem | No existe   | Alta                                   |
| Reabastecimiento       | Media       | Alta                                   |
| Complejidad del modelo | Baja        | Media (se requiere cálculo adicional)  |

|                |                  |                                                              |
|----------------|------------------|--------------------------------------------------------------|
| Aplicable para | Análisis general | Gestión de inventarios basado en categorías del análisis ABC |
|----------------|------------------|--------------------------------------------------------------|

**Elaborado por: Autores**

**Comparación resultados Escenario 1 Vs. Escenario 2 Vs. Escenario 3:** En el análisis comparativo de los escenarios propuestos en la simulación se puede observar como varía el desempeño del sistema de gestión de inventario considerando diferentes situaciones con la demanda y horizontes de planificación. Por un lado, se puede notar que el escenario 1 y 2 consideran la demanda constante, mientras que el escenario 3 considera variabilidad aleatoria, reflejando de esta manera una mejor realidad operativa. De esta manera también se evidencia que, aunque los escenarios reflejan costos controlados, en el escenario 3 se obtiene una visión con mayor precisión de los riesgos en quiebre, siendo este un punto clave en la gestión para que sea más efectiva y adaptativa. Ver Tabla 16.

**Tabla 16:** Resumen Comparativo de Supuestos por Escenario

| Supuesto                  | Escenario 1                                       | Escenario 2                                                      | Escenario 3                                                                         |
|---------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de demanda           | Constante basado en el promedio mensual histórico | Constante con horizonte extendido                                | Aleatorio con distribución normal con 20% de desviación estándar                    |
| Horizonte de simulación   | 12 meses                                          | 24 meses                                                         | 24 meses                                                                            |
| Modelo aplicado           | EOQ dinámico con reabastecimiento periódico       | EOQ dinámico con reabastecimiento periódico, con mayor horizonte | EOQ dinámico con reabastecimiento periódico con variabilidad estocástica en demanda |
| Demanda mensual ( $D_i$ ) | Calcula como promedio histórico                   | Calcula como promedio histórico                                  | Generada de manera aleatoria por ítem por mes                                       |

|                        |                                                                 |                                                                 |                                                                                      |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Frecuencia de pedido   | Calculada mediante la ecuación $\frac{Q_i}{D_i}$                | Calculada mediante la ecuación $\frac{Q_i}{D_i}$                | Calculada mediante la ecuación $\frac{Q_i}{D_i}$ , pero se considera la variabilidad |
| Reabastecimiento       | De acuerdo a los meses en que establece la frecuencia de pedido | De acuerdo a los meses en que establece la frecuencia de pedido | De acuerdo a los meses en que establece la frecuencia de pedido                      |
| Costo de pedido        | \$50                                                            | \$50                                                            | \$50                                                                                 |
| Costo de mantenimiento | 25% del costo unitario                                          | 25% del costo unitario                                          | 25% del costo unitario                                                               |
| Stock inicial          | Igual a $Q_i$                                                   | Igual a $Q_i$                                                   | Igual a $Q_i$                                                                        |

**Elaborado por: Autores**

Considerando los tres escenarios planteados, se observa que el aporte del escenario 3 se basa en la incertidumbre y la aleatoriedad que se considera en la demanda, un criterio que no fue considerado en

los escenarios 1 y 2. Por otro lado, permite evaluar el comportamiento de los ítems frente a fluctuaciones reales considerando posibles quiebres y cambios en los costos. Genera una simulación más realista que nos permite mayor robustez en las políticas de inventario. Ver Tabla 17.

**Tabla 17:** Análisis Comparativo de Escenarios de Simulación

|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

**Elaborado por: Autores**

Finalmente, para llevar a cabo una eficiente gestión de inventarios de partes y repuestos aeronáuticos donde se debe considerar que la disponibilidad es crítica puesto que se debe cumplir con parámetros de seguridad y regulaciones en el ámbito, la variabilidad en la demanda es frecuente porque se realizan diferentes tipos de mantenimientos entre estos programados y no programados y los costos en inventarios negativos o con quiebre son altos por lo que es recomendable el escenario 3 dado que este simula aspectos más realistas e inciertos, de esta manera se pueden establecer políticas que sean más robustas que consideren los quiebres, variabilidad y las decisiones basadas en la relación costo/beneficio. Su implementación apoyaría en la toma de decisiones de una forma proactiva y alineada con los estándares de disponibilidad que son exigidos en el ámbito aeronáutico.

## **Conclusiones y Recomendaciones**

### **Conclusiones**

De la fundamentación teórica se puede observar que los modelos de gestión de inventarios que están basados en ecuaciones diferenciales brindan una representación más apegada a la realidad del comportamiento dinámico del stock. Estos modelos son útiles especialmente cuando se busca modelar la evolución del inventario en función del tiempo y considerando condiciones como la demanda variable, como fue el caso del escenario 3, lo que aporta una base matemática sólida para poder establecer estrategias que se adapten de la mejor forma.

Mediante los escenarios planteados, es decir, el de demanda constante, horizonte extendido y demanda aleatoria, se pudo validar la aplicación práctica del modelo propuesto. En los resultados obtenidos mediante la simulación se muestra que un mismo modelo matemático puede ajustarse a diferentes supuestos operativos, de esta forma se obtiene información importante para la toma de decisiones en el ámbito de la gestión de inventarios de partes y repuestos aeronáuticos.

El modelo matemático propuesto basado en ecuaciones diferenciales, está conformado por elementos de reabastecimiento periódico y EOQ Dinámico. Con este modelo se pudo simular la evolución del inventario en cada ítem en relación

al consumo y el reabastecimiento planificado, de esta manera se identifican puntos críticos de quiebre en stock y se optimiza la cantidad económica de pedido.

De los escenarios propuestos, el escenario 3 fue el recomendado, puesto que se pudo revelar ineficiencias y área de mejora que no se podían identificar bajo las condiciones ideales. De esta manera se puede ratificar que considerar la demanda aleatoria permite una valoración más exigente de la eficiencia en la gestión de inventarios.

Con las validaciones obtenidas por los expertos mediante el Método Delphi se puede expresar que los resultados obtenidos del modelo matemático propuesto son coherente, aplicable y valioso como herramienta de gestión de inventarios y permite el control de los repuestos aeronáuticos. Sin embargo, se sugiere considerar aspectos como la diversidad de situaciones en los que las aeronaves necesitan mantenimiento.

## **Recomendaciones**

Con los resultados obtenidos y de acuerdo a las conclusiones se recomienda lo siguiente:

Integrar de manera formal el uso de modelo matemáticos que estén basados en ecuaciones diferenciales en las estrategias de planificación del inventario, específicamente en el ámbito aeronáutico en donde el entorno impone una demanda con alta variabilidad.

Desarrollar nuevos escenarios que sirvan como herramienta para evaluar nuevas políticas en el manejo del inventario antes de la implementación real, de esta manera se reducen riesgos y se mejora el proceso de la toma de decisiones estratégicas.

Se recomienda también aplicar el modelo propuesto para que sirva como base al momento de establecer políticas en el manejo de inventario dinámico, de esta manera se responde de manera automática a los cambios que existan en la demanda, se pueden realizar ajuste en la frecuencia de reabastecimiento y se genera la cantidad de pedido de forma eficiente.

Es recomendable establecer un control continuo mediante indicadores de desempeño dado que es clave para poder comparar los resultados y así actualizar las estrategias de abastecimiento periódicamente.

Ejecutar de manera periódica el Método Delphi con expertos en el área logística aeronáutica para validar de manera técnica el modelo matemático propuesto y adaptar los parámetros a las condiciones específicas generadas.

## REFERENCIAS

- Andagana, E. (2024). *Modelo de gestión de inventarios en la empresa Cctz Locales ubicada en la provincia del Guayas*. Ambato: Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Contabilidad y Auditoría, Carrera de Ingeniería Financiera. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/2d6d02d9-e0ff-4ec3-8d6f-1c263486d530/content>
- Ascencio Plúas , N. E. (2022). *Repositorio Universidad Estatal Península de Santa Elena*. Obtenido de Control interno de los inventarios en la empresa Esquina de Pérez cantón La Libertad, provincia de Santa Elena, año 2021: <https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/8499/4/UPSE-TCA-2022-0045.pdf>
- AVC. (2019). *Regulaciones Aeronáuticas Venezolanas – RAV (Actualizado 2019)*. Obtenido de [www.aviacioncivil.com.ve](http://www.aviacioncivil.com.ve): <https://www.aviacioncivil.com.ve/regulaciones-aeronauticas-venezolanas/>
- Betancourt, D. (24 de Septiembre de 2017). *Modelos determinísticos de inventario: ¿Cuáles son y cómo se realizan?* Obtenido de [ingenioempresa.com](http://ingenioempresa.com):

[www.ingenioempresa.com/modelos-deterministicos-de-inventario](http://www.ingenioempresa.com/modelos-deterministicos-de-inventario).

Betancourt, D. F. (07 de marzo de 2018). *Modelos probabilísticos de inventario: ¿Cuáles son y cómo se realizan?* Obtenido de Modelos probabilísticos de inventario: ¿Cuáles son y cómo se realizan?: [www.ingenioempresa.com/modelos-probabilisticos-inventario](http://www.ingenioempresa.com/modelos-probabilisticos-inventario)

Borbor, A., & López, J. (2024). Estrategias de control de inventario de suministros para la mejora de la rentabilidad de una compañía agrícola-minera. *REVISTA INVECOM*, 4(2), 10. Obtenido de <https://ve.scielo.org/pdf/ric/v4n2/2739-0063-ric-4-02-e040285.pdf>

Calle, R. (2023). *Repositorio Universidad Estatal Península de Santa Elena*. Obtenido de repositorio.upec.edu.ec: <https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/10085/1/U-PSE-TCA-2023-0079.pdf>

Ccoa, M., & Alanoca, L. (2017). *Modelamiento matemático de sistemas dinámicos económicos mediante ecuaciones en diferencias*. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Facultad de Ciencias, Escuela Profesional de Matemática, Cusco-Perú. Obtenido de

<https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/2709/253T20170353.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

CGE. (2017). *Reglamento General para la Administración, Utilización, Manejo y Control de los Bienes y Existencias del Sector Público*. Obtenido de [www.contraloria.gob.ec](http://www.contraloria.gob.ec): <https://www.contraloria.gob.ec/WFDescarga.aspx?id=502&tipo=nor>

Chopra, S. &. (2019). *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation*. Pearson.

Clark, A., & Scarf, H. (1960). Optimal policies for a multi-echelon inventory problem. *Management Science*, 6(4), 475-490. doi:10.1287/mnsc.6.4.475

Contreras, I., Paralela, C., Martín, A., & Tenorio, A. (2013). Ecuaciones diferenciales y en diferencias aplicadas a los conceptos económicos y financieros. *Revista de Metodos Cuantitativos para la Economia y la Empresa*, 165-199. Obtenido de <https://www.upo.es/revistas/index.php/RevMetCuant/articloe/download/2186/1753/6801>

CPCON, G. (6 de Abril de 2023). *NIC 02/NIF C-4: Inventarios*. Obtenido de [www.grupocpcon.com](http://www.grupocpcon.com):

<https://www.grupocpcon.com/es-mx/nic-02-nif-c-4-inventarios/>

DGAC. (2025). *Publicación de Información Aeronáutica*.

Obtenido de [www.ais.aviacioncivil.gob.ec/](http://www.ais.aviacioncivil.gob.ec/):

<https://www.ais.aviacioncivil.gob.ec/ifs3/aip/GEN%200.1>

EasyMaint. (2025). *Inventarios de Repuestos de Mantenimiento:*

*Clave para la Eficiencia y Productividad en las*

*Operaciones*. Obtenido de [easy-maint.net](http://easy-maint.net):

<https://www.easy-maint.net/es/blog/inventarios-de-repuestos-de-mantenimiento-clave-para-la-eficiencia-y-productividad-en-las-operaciones.html>

Echeverria, L. (2007). Análisis de la producción y las

operaciones. Steven Nahmias. *Revista Científica*

*Guillermo de Ockham*, 5(2), 157-158. Obtenido de

<https://bibliotecadigital.usb.edu.co/server/api/core/bitstreams/fb81cf1f-7468-4459-b9a7-44c28ab15e58/content>

FasterCapital. (17 de Junio de 2024). *Tiempo de entrega*

*reduccion del tiempo de entrega para mejorar la eficiencia*

*del inventario periodico*. Obtenido de [fastercapital.com](http://fastercapital.com):

<https://fastercapital.com/es/contenido/Tiempo-de-entrega--reduccion-del-tiempo-de-entrega-para-mejorar-la-eficiencia-del-inventario-periodico.html>

Federación de Empresarios del Metal, F. (2023). *Directorio de empresas del sector aeroespacial de Sevilla*. Obtenido de Directorio de empresas del sector aeroespacial de Sevilla: [https://www.prodetur.es/prodetur/www/empresas/invertir-en-sevilla/doc/FEDEME\\_cat-empresas-aeroespacial\\_ES\\_2023.pdf](https://www.prodetur.es/prodetur/www/empresas/invertir-en-sevilla/doc/FEDEME_cat-empresas-aeroespacial_ES_2023.pdf)

García, M., & San Andrés, E. (2021). Diseño de un Sistema de Gestión por Procesos para El Manejo de Inventarios. Caso: Ferretería Quiroz. *Revista Científica Multidisciplinaria Arbitrada YACHASUN*, 5(9), 180-203. doi:<https://doi.org/10.46296/yc.v5i9edespsoct.0118>

Google Maps. (2025). *Google Maps*. Obtenido de google.com: [https://www.google.com/maps/place/Base+A%C3%A9rea+de+Salinas/@-2.2018409,-80.9938584,16.75z/data=!4m6!3m5!1s0x902e11fc311e4d83:0x831bb552727e9e11!8m2!3d-2.2019426!4d-80.9903801!16s%2Fg%2F11b7fv0wj6?authuser=0&entry=ttu&g\\_ep=EgoyMDI1MDUxMy4xIKXMDSOASAFQAw%2F11b7fv0wj6?authuser=0](https://www.google.com/maps/place/Base+A%C3%A9rea+de+Salinas/@-2.2018409,-80.9938584,16.75z/data=!4m6!3m5!1s0x902e11fc311e4d83:0x831bb552727e9e11!8m2!3d-2.2019426!4d-80.9903801!16s%2Fg%2F11b7fv0wj6?authuser=0&entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDUxMy4xIKXMDSOASAFQAw%2F11b7fv0wj6?authuser=0)

Guale, J. (2025). *Modelo de inventarios para la optimización de costos en la Empresa Aguas Peninsulares S.A., cantón Salinas, provincia de Santa Elena*. La Libertad. UPSE, Matriz. Facultad de Ciencias de la Ingeniería: La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena. Obtenido

de

[https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/12545/1/U  
PSE-TII-2025-0006.pdf](https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/12545/1/U<br/>PSE-TII-2025-0006.pdf)

Gupta, A. &. (2021). *Aviation Inventory Management: Mathematical Models and Optimization Techniques*. Springer.

Huanca Pérez, L. M., & RuttiReynoso, K. B. (2021). *Universidad Cesar Vallejo*. Obtenido de Universidad Cesar Vallejo: [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/84011/Huanca\\_PLM-Rutti\\_RKB-SD.pdf?sequence=7&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/84011/Huanca_PLM-Rutti_RKB-SD.pdf?sequence=7&isAllowed=y)

Infodefensa.com. (2024). *La Fuerza Aérea de Ecuador recibe el entrenador Diamond DA20-C1*. Obtenido de La Fuerza Aérea de Ecuador recibe el entrenador Diamond DA20-C1: <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/3143233/fuerza-aerea-ecuador-recibe-entrenador-diamond-da20-c1>

JVP. (2016). *Ajuste y revisión del plan maestro de agua potable, alcantarillado sanitario y alcantarillado pluvial*. Guayaquil.

Kinnison, H., & Siddiqui, T. (2021). *Aviation maintenance management* (Vol. 3era Ed.). McGraw-Hill.

Landeta, J. B. (2021). Delphi method: Current developments and future research priorities. *Technological Forecasting and Social Change*, 173.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121064>

Logística, D. G. (2020). *Manual General de Mantenimiento*. Salinas: Departamento Logístico “Esma”.

López, N. D.-R. (2024). Aplicación del Método Delphi para la validación de un instrumento para medir actitudes, conocimientos y uso de estrategias pedagógicas interdisciplinarias. *REIRE Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, 17(1), 1-20. Obtenido de <https://revistes.ub.edu/index.php/REIRE/article/view/42659>

Meana, P. (2024). *Gestión de inventarios*. Paraninfo S.A.

Mecalux, S. (2023). *Modelos de inventario determinísticos vs. probabilísticos*. Obtenido de Modelos de inventario determinísticos vs. probabilísticos: <https://www.mecalux.com.mx/blog/modelos-de-inventario>

Metropolitana, U. A. (16 de Diciembre de 2020). *Programación Dinámica*. Obtenido de Programación Dinámica: <https://sites.google.com/view/programacion-dinamica-bfghm/inicio?authuser=0>

Ministerio de Finanzas, M. (2015). *Manual de Procedimientos de Inventario General de Bienes*. Obtenido de Manual de Procedimientos de Inventario General de Bienes:  
[https://www.finanzas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/03/A2\\_Manual\\_Procedimientos\\_Inventarios\\_Definitivo.pdf](https://www.finanzas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/03/A2_Manual_Procedimientos_Inventarios_Definitivo.pdf)

Montes, J. L. (2014). *Gestión de inventarios*. Editorial Elearning SL. Obtenido de  
[https://books.google.com.ec/books?id=DHpXDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=DHpXDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

Mora Arquez, G. M. (2018). *Diseño de un Modelo de Inventario Epq, Considerando un Sistema de Producción Imperfecto con Demanda Estocástica y Dependiente de los Esfuerzos de Ventas en Esquemas Colaborativos*. Cartagena de Indias: Universidad Tecnológica de Bolívar Facultad de Ingenierías Maestría en Logística Integral.

MTOP. (2015). *Ley de Aviación Civil*. Obtenido de [www.obraspublicas.gob.ec](http://www.obraspublicas.gob.ec):  
<https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/03/LEY-DE-AVIACION-CIVIL.pdf>

Nahmias, S. &. (2015). *Production and Operations Analysis*.  
Waveland Press.

Núñez, M., & Tarazona, L. (2024). Gestión de inventarios de una compañía importadora de repuestos de transmisión de potencia de maquinaria pesada. *Revista Ingeniería Industrial*(47), 79-102.

doi:<https://doi.org/10.26439/ing.ind2024.n47.7116>

Oliveira, C. K., Menck, H. G., Takito, P. Y., Cirilo, E. R., Natti, P. L., & Takano, E. R. (2018). Gestão de Estoques: Modelo LEC versus Modelo (Q,R). *Applied Production Engineering*, 2, 46-60. doi:<https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.10003>

Osorio, J., & Escobar, N. (2018). Gestión de inventarios de repuestos considerando el riesgo. *Revista Espacios*, 39(44), 29. Obtenido de <https://www.revistaespacios.com/a18v39n44/a18v39n44p29.pdf>

Pakhira, R., Ghosh, U., Sarkar, S., & Narayan, V. (2019). Study of memory effect in an EOQ model for completely backlogged demand during shortage. *arXiv Is Hiring a DevOps Engineer*, 1-18.

doi:<https://arxiv.org/abs/1904.08193>

- Pérez, G. S. (2022). Validación de contenido de un cuestionario mediante el Método Delphi modificado. *Educación Médica*, 45–52.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.edumed.2022.01.005>
- Pinzón, C. (2022). *Modelos Matemáticos Aplicados al Mantenimiento Predictivo*. Obtenido de Sistemas de Gestión Demantenimiento Computarizado Cmms: <https://cmmshere.com/wp-content/uploads/2022/11/art-CMMShere-mantenimiento-predictivo.pdf>
- Portal único de trámites ciudadano, G. (2017). *Reglamento Administración y Control de bienes del Sector Público*. Obtenido de [www.gob.ec](http://www.gob.ec):  
<https://www.gob.ec/regulaciones/reglamento-administracion-control-bienes-sector-publico-0>
- RAE, R. A. (2024). *Diccionario de la lengua española*. Obtenido de [dle.rae.es](http://dle.rae.es): <https://dle.rae.es/inventario>
- Reina, S. (2024). *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI*. Obtenido de [repositorio.upec.edu.ec](http://repositorio.upec.edu.ec):  
<https://repositorio.upec.edu.ec/server/api/core/bitstreams/7c47821b-e1af-4929-a5a5-3fe8431524cd/content>
- RGS Engines, P. (2025). *Repuestos Aeronáuticos y Marítimos*. Obtenido de Repuestos Aeronáuticos y Marítimos:

<https://www.rgsenginesparts.com/blog-y-noticias/repuestos-aeronauticos-y-maritimos.html>

Sánchez, Y., Trujillo, L., Marqués, M., & Pancorbo, J. (2023). Planificación del Sistema de Inventarios. Caso de Estudio Photoclub Flash, División Comercial Hicacos. *Economía y Negocios*, 14(1), 26-39.

doi:<https://doi.org/10.29019/eyn.v14i1.1092>

SERCOP. (2022). *Resolucion de bienes SERCOP*. Obtenido de Resolucion de bienes SERCOP: [https://portal.compraspublicas.gob.ec/sercop/wp-content/uploads/downloads/2023/02/resolucion\\_bienes\\_sercop-2022\\_rev\\_dj-signed-signed-signed-1.pdf](https://portal.compraspublicas.gob.ec/sercop/wp-content/uploads/downloads/2023/02/resolucion_bienes_sercop-2022_rev_dj-signed-signed-signed-1.pdf)

Silver, E. A. (2016). *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*. John Wiley & Sons.

Taft, E. W. (1918). The Most Economical Production Lot. *The Iron Age*(101), 1410–1412.

Taha, H. A. (2017). *Operations Research: An Introduction*. Pearson.

TMAS, A. (4 de Julio de 2022). *TMAS Aviación Divulgación Aeronáutica*. Obtenido de TMAS Aviación Divulgación Aeronáutica: <https://www.tmas.es/blog/mecanica-de-aviones/en-que-consiste-el-mantenimiento-aeronautico/>

Torres Sierra, C. (2022). *Análisis ABC y su relevancia en la gestión de inventarios: un estudio de revisión. Análisis sistemático de literatura*. Colombia: Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ciencias Económicas, Administrativas y Contables, Contaduría Pública, Montería. Obtenido de <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/a0abfa32-cec8-45c3-b6da-eba6499d0afd/content>

Webinfomil.com. (2020). *La Fuerza Aérea Ecuatoriana presentó sus nuevos aviones de entrenamiento Grob G 120TP*. Obtenido de La Fuerza Aérea Ecuatoriana presentó sus nuevos aviones de entrenamiento Grob G 120TP: <https://www.webinfomil.com/2020/11/la-fuerza-aerea-ecuatoriana-presento.html>

Zill, D. (2014). *Ecuaciones diferenciales con aplicaciones de modelado* (10ma ed.). Cengage Learning. Obtenido de <https://dct.digitalcontent.com.co/sview/default.aspx>

Zipkin, P. H. (2000). *Foundations of Inventory Management*. McGraw-Hill.

***Modelamiento de estrategias de gestión  
de inventarios de partes y repuestos:***

***Un enfoque mediante ecuaciones  
diferenciales***

**Colectivo de autores**

ISBN: 978-9942-580-35-1

