

**Propuesta de un Sistema de Control de Confiabilidad Técnica Enfocada  
en Fallas Operacionales, Aplicable para Aerolíneas en Colombia**



**Autores**

**José Alexander Yépez López**

**Francisco Losada Torres**

**Jairo Alexander Gil Muñoz**

**Julián David Ramírez Rojas**

**Tutor**

**Diana Catalina Londoño Restrepo**

**Magister en Administración de empresas con especialidad en Sistemas integrados de  
Calidad, Seguridad y Medio Ambiente**

**Universidad el Bosque**

**Especialización en Gerencia de Producción y Productividad**

**Bogotá, Colombia**

**Noviembre de 2022**

## Contenido

Resumen.....	6
Introducción .....	7
1. Formulación del proyecto .....	8
1.1 Problema de investigación.....	8
1.1.1. Identificación.....	8
1.1.2. Descripción .....	9
1.1.3. Planteamiento.....	10
1.2 Justificación.....	11
1.3 Objetivos.....	12
1.3.1. Objetivo General.....	12
1.3.2. Objetivos específicos .....	12
1.4 Marco de referencia.....	12
1.4.1. Antecedentes .....	12
1.4.2. Marco Conceptual.....	17
1.4.3. Marco teórico .....	20
1.4.4. Marco Normativo.....	26
1.5 Metodología.....	27
1.6 Alcance .....	29
2. Estado del arte referente a la implementación de los programas de confiabilidad técnica enfocado en fallas operacionales de una flota de aviones.....	30
2.1 Reflexión sobre el estado del arte actual .....	31
2.2 Reducción de costos de mantenimiento y la confiabilidad .....	33
2.3 Incremento de la seguridad del vuelo.....	34
2.4 Efectos de la confiabilidad en el mantenimiento.....	34

3. Definición de parámetros requeridos para un sistema de identificación, seguimiento y control de un programa de confiabilidad técnica enfocado en fallas operacionales de una flota de aviones aplicable en aerolíneas comerciales colombianas.....	40
3.1 Proceso del sistema de identificación, seguimiento y control.....	40
3.2 Cálculo de costos de confiabilidad.....	42
4. Desarrollo un sistema de identificación, seguimiento y control de un programa de confiabilidad técnica enfocado en fallas operacionales de una flota de aviones aplicable en aerolíneas comerciales colombianas.....	45
5. Conclusiones y Recomendaciones.....	65
5.1 Conclusiones.....	65
5.2 Recomendaciones.....	65
6. Referencias.....	66
7. ANEXOS.....	68

## Listado de tablas

Tabla 1. Comparación entre los programas MSG-2 y MSG-3.....	38
Tabla 2. Eventos de falla totales.....	45
Tabla 3. Pesos equivalentes al tipo de falla presentada.....	46
Tabla 4. Factor Multiplicatorio por franja horaria .....	47
Tabla 5. Clasificación de los eventos de falla por mes .....	48
Tabla 6. Medidas de desempeño referentes a Confiabilidad.....	50
Tabla 7. Tasa de variación de Confiabilidad.....	51
Tabla 8. Severity Index por mes.....	53
Tabla 9. Clasificación inicial de ATA de mayor impacto al Severity Index.....	55
Tabla 10. ATA que presentan empate en %CA del mes .....	55
Tabla 11. %CA para Noviembre .....	56
Tabla 12. %CA para Enero.....	56
Tabla 13. %CA para Agosto.....	57
Tabla 14. Clasificación final de ATA de mayor impacto al Severity Index .....	57
Tabla 15. %CA al Severity Index de cada mes .....	58
Tabla 16. Peso ponderado de los Modos de falla presentados en el mes de Julio .....	59
Tabla 17. Histórico de eventos por Modo de falla .....	60
Tabla 18. Valor del OIR por Modo de Falla para cada ATA del mes de Julio .....	62
Tabla 19. Tendencias generadas por el OIR (6M-3M-1M) para los Modos de falla .....	63
Tabla 20. Interpretación el OIR (6M-3M-1M) para los Modos de falla de cada ATA.....	64

## Listado de figuras

Figura 1. Comportamiento pasajeros origen y destino.....	9
Figura 2. Proceso General Valoración de Confiabilidad.....	28
Figura 3. MSG-3 - análisis de nivel I - categorías de falla.....	37
Figura 4. Gestión y Administración Programa de Confiabilidad.....	39
Figura 5. Formato ATA para manuales de mantenimiento.....	42
Figura 6. Analisis confiabilidad de despacho por variación de demoras.....	43
Figura 7. Costos de cancelación.....	44
Figura 8. Pérdida de Confiabilidad no percibida por mes.....	50
Figura 9. Comportamiento de la Confiabilidad (F) vs Confiabilidad (Z).....	52
Figura 10. Severity Index consolidado por ATA.....	54
Figura 11. Severity Index del Top 3 de ATA por mes.....	59
Figura 12. OIR por Modo de falla para el mes de Julio.....	62

## Listado de ecuaciones

Ecuación 1. Cuantificación del riesgo.....	34
Ecuación 2. Dispatch Reliability.....	48
Ecuación 3. Porcentaje Delta.....	49
Ecuación 4. Variación de la confiabilidad.....	51
Ecuación 5. Severity Index.....	53
Ecuación 6. %CA al Severity Index.....	54
Ecuación 7. Roll Average por Modo de falla.....	61

## Resumen

Las compañías aéreas se ven enfrentadas hoy en día a la competencia de los mercados que van en evolución y constante desarrollo tecnológico; desde 1903, cuando Wilbur y Orville Wright hicieron historia, ciertamente la aviación recorrió un largo camino haciendo de los aviones el medio de transporte más seguro del mundo. Para esto los modelos y métodos de mantenimiento, también fueron evolucionado y con ello, los beneficios en términos de eficiencia, costos y seguridad.

El planteamiento del problema conlleva a revisar aspectos básicos del mantenimiento centrado en la confiabilidad y recomendaciones generadas por autoridades de aviación que han venido mediante del desarrollo y los avances tecnológicos de la aviación en el mundo.

En la actualidad las exigencias operacionales, la simplificación de procesos y la búsqueda de soluciones costo eficientes, han llevado a las aerolíneas a replantear sus métodos de confiabilidad con la complejidad que conlleva mantener la seguridad operacional, calidad y la eficiencia de sus operaciones para seguir siendo competitivos.

El objetivo general de esta investigación es analizar y proponer un sistema de confiabilidad aplicable para aerolíneas que operen en el estado colombiano, y que además se adapte a las necesidades de una operación exigente, de utilización por encima de los estándares de la industria.

El desarrollo del sistema contiene un enfoque cuantitativo, el cual plantea una ruta que se construyó de acuerdo con la caracterización y clasificación de los eventos de falla para una flota de aviones durante un periodo de tiempo determinado, evaluando las medidas de desempeño propias de la confiabilidad en cada una de sus etapas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que la aplicación del sistema es viable y permite a cualquier aerolínea colombiana identificar las tendencias generadas por los Modos de Falla, y de esta manera ser usada como una herramienta útil para la toma de decisiones sobre los programas de confiabilidad.

**Palabras clave:** Efectividad, Eficiencia, Programa de Confiabilidad, Productividad, Programa de Mantenimiento.

## Introducción

Las aerolíneas comerciales se ven enfrentadas hoy en día a los retos de la demanda creciente de las aerolíneas modernas. Estudios demuestran que los vuelos comerciales hoy en día han dejado de ser un lujo para convertirse en una necesidad o prácticamente un gusto que muchos ahora pueden darse. Los intereses de los pasajeros también han cambiado y por ende la oferta de vuelos baratos que satisfacen dichas preferencias que obligan a las aerolíneas a ser más competitivas, eficientes y confiables.

Debido a la eficiencia operacional, la exigencia de los estándares de calidad de la industria aeronáutica y el aumento de la productividad en los procesos de mantenimiento, términos como la confiabilidad cobran relevancia al momento de hablar de reducción de costos de mantenimiento, sin afectar la seguridad operacional y aumentar el rendimiento de las aeronaves.

Los sistemas de confiabilidad tienen como objetivo principal, analizar tendencias en las operaciones de las aeronaves, para predecir fallas mecánicas y mejorar los programas de mantenimiento adelantándose y previniendo eventos operacionales no deseados, ayudando a las aerolíneas a ser más costos eficientes.

En el capítulo final se muestra de manera sistémica los eventos operaciones que se generan en un periodo determinado de tiempo sobre una flota de aviones específica y la incidencia que estos tienen sobre las medidas de desempeño propias de la confiabilidad, comenzando a partir de su identificación y clasificación por afectación a la confiabilidad, sistema involucrado y peso ponderado, los cuales posteriormente se desagregan siguiendo una serie de reglas específicas para encontrar tendencias puntuales que permitan orientar el seguimiento y control de los mismos, y que de esta manera se consideren como una herramienta útil para la toma de decisiones sobre el programa de confiabilidad de una aerolínea.

El presente trabajo de investigación propone un sistema de confiabilidad aplicable para aerolíneas en Colombia, que mejore la productividad y eficiencia, adaptándose a las necesidades un mercado que va en constante evolución en este sector.

## **1. Formulación del proyecto**

### **1.1 Problema de investigación**

Los operadores aéreos dedican sus esfuerzos para que sus aerolíneas sean rentables, esto significa que una aeronave debe mantenerse aeronavegable, es decir óptima para el vuelo. Los tiempos del mantenimiento no-programado generan sobre costos debido a la inactividad operativa haciendo que la aerolínea no pueda cumplir a sus clientes con los itinerarios prometidos o deban cancelar vuelos.

Contrario a lo que popularmente se cree, el ejercicio del mantenimiento predictivo no es un tema de especulación sobre cuándo se presentará una falla o daño en un equipo, sino que se estructura en una serie de técnicas fundamentadas en pronosticar y anticipar una posible falla con un alto grado de probabilidad de acierto, ya que aunque no se puede determinar de manera exacta cuándo, dónde y cómo va a ocurrir una falla, sí es posible minimizar significativamente el riesgo y la incertidumbre aplicando estas técnicas planificadas y orientadas hacia la confiabilidad, en un ciclo de ajuste de los procesos con el fin de ser efectivos y precisos, reduciendo el impacto operacional sin llegar a generar una sobre ejecución de tareas de mantenimiento o baja productividad.

#### **1.1.1. Identificación.**

La globalización económica, la interconexión en tiempo real, y la necesidad de acortar distancias, son algunos de los factores que influyen directamente en el estilo de vida de la sociedad actual; su forma de comunicarse, relacionarse, actuar y movilizarse, han creado nuevas exigencias. En ese orden de ideas, el mercado del transporte aéreo tuvo que sufrir una metamorfosis en lo referente a su enfoque comercial, y a la producción de una oferta de servicios que se ajuste a las necesidades actuales. En conclusión, se hizo necesario ampliar los servicios ofertados e intensificar las frecuencias de los vuelos (Moubray, 2004).

Por lo tanto, la competencia agresiva en los mercados externos y locales han obligado a las compañías a buscar y/o desarrollar estrategias en aspectos importantes como: precio, calidad, puntualidad y confiabilidad las cuales, en conjunto cobran un interés relevante, como factor diferenciador en las compañías que entregan oportunamente, cumplen con los requisitos y

estándares que espera el cliente, a un precio competitivo y alcanzable para el segmento del mercado. No obstante, las premisas indicadas anteriormente, requieren productos con rendimientos libres de fallas, en rangos de tiempo que satisfagan las necesidades del cliente (Acuña, 2003).

Es importante anotar que el significado de confiabilidad y las técnicas de calidad y productividad como lo indica Acuña (2003), tuvo su génesis en la segunda guerra mundial, donde uno de los objetivos esenciales consistía en lograr un elevado grado de confianza en el rendimiento de los equipos, esto con el fin de mitigar la probabilidad de incidencias adversas. Esta técnica se ha venido afinando a través de los años, como una materia de investigación, en la que confluyen diversidad de conceptos de física, matemática y estadística.

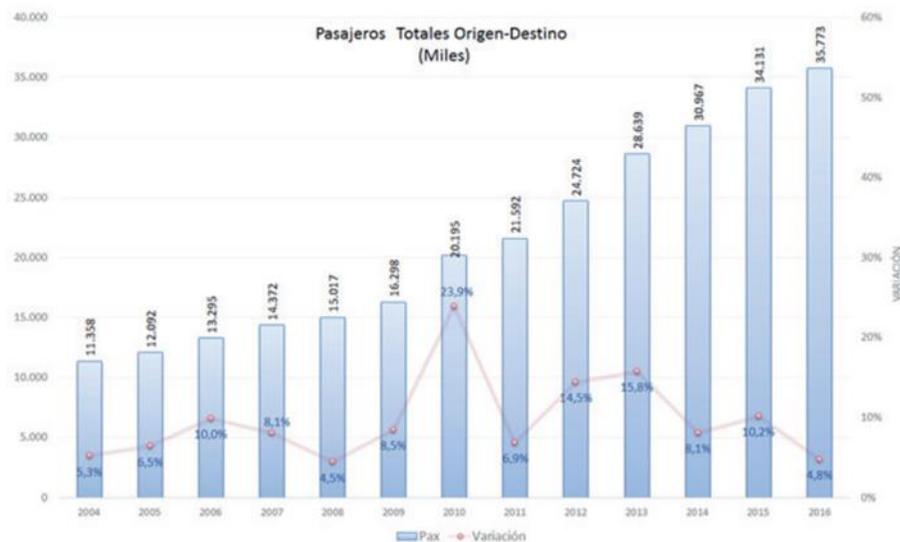
Es así, que se define la confiabilidad como la probabilidad de que un componente o producto se desempeñe cumpliendo las expectativas y funciones de diseño, en ambientes y condiciones según las especificaciones predefinidas (Acuña, 2003).

En conclusión, las compañías aéreas se ven enfrentadas hoy en día a la competencia de los mercados, haciendo que se tengan que volver más competitivas frente a lo que el mercado hoy demanda. Y para esto los modelos y métodos de mantenimiento, también han evolucionado.

### **1.1.2. Descripción**

En la industria aeronáutica el concepto de confiabilidad es usado ampliamente, como una solución a los problemas técnicamente probables que no son controlados por el mantenimiento programado, pero que deben ser atendidos en gran parte por la necesidad que tiene el sector de garantizar y generar confianza en su operación, con un margen estrictamente reducido para fallas e incidencias, más aún, con el incremento de rutas y así mismo de vuelos y nuevas aerolíneas entrando a la competencia. A continuación, en la figura 1 se observan los datos del tráfico de pasajeros en Colombia en el año 2016 (Aeronáutica Civil de Colombia, 2017, pág. 9).

Figura 1. Comportamiento pasajeros origen y destino



Fuente: (Aeronáutica Civil de Colombia, 2017, pág. 10)

En el 2016 se movilizaron un total de 35,77 millones de pasajeros origen-destino, lo que representa un crecimiento del 4,81% con relación al año 2015, equivalente a 1,64 millones de personas. Esta es la segunda tasa de crecimiento más baja desde el año 2008, periodo en el cual el transporte de pasajeros se incrementó en 4,49%. En 2016 el tráfico doméstico representó el 67% del tráfico total, disminuyendo la participación que tuvo en el año 2015, en el cual los pasajeros domésticos concentraron el 67,73% de los pasajeros origen-destino. En 2016 se triplica el número de pasajeros de transporte aéreo del año 2004; además excede el doble de los pasajeros movilizadas en 2009. En los últimos diez años la tasa promedio de crecimiento anual de los pasajeros origen-destino fue de 10,4% (Aeronáutica Civil de Colombia, 2017).

A causa del incremento operacional, la proporción de eventos de falla por número de vuelos tienden a incrementarse por el uso frecuente de los sistemas y equipos de las aeronaves. Por lo tanto, es imprescindible estructurar los programas de mantenimiento orientados hacia la confiabilidad basados en un marco predictivo que permita diagnosticar de manera precisa la condición de los sistemas críticos presentes en un avión, y finalmente apuntan a una disminución de los costos producidos por eventos de falla potencial, que en el largo plazo derivarán en una estabilización de los costos de mantenimiento.

### 1.1.3. Planteamiento.

La pregunta de investigación que se ha planteado es:

¿Cómo se estructura un sistema de identificación, seguimiento y control efectivo de confiabilidad técnica enfocado en fallas operacionales de una flota de aviones, para aerolíneas en Colombia?

El planteamiento de esta pregunta conlleva a revisar aspectos básicos (teóricos) y recomendaciones generadas por autoridades de aviación y que han venido evolucionando a medida del desarrollo y los avances tecnológicos de la aviación en el mundo.

## **1.2 Justificación**

Es importante para los autores de la presente investigación, como estudiantes de la Especialización de Producción y Productividad de la Universidad El Bosque, profundizar en métodos de confiabilidad para obtener mayor productividad y eficiencia en los programas de confiabilidad aplicables en aerolíneas y otros sectores industriales de interés en Colombia.

En la actualidad las exigencias operacionales, la simplificación de procesos y la búsqueda de soluciones costo eficientes, han llevado a las aerolíneas a replantear sus sistemas de identificación de fallas y toma de decisiones con el fin de mantener la seguridad operacional, calidad y eficiencia de sus operaciones para seguir siendo competitivos.

La ventaja y el beneficio obtenido gracias al desarrollo de un modelo de confiabilidad ajustado a las nuevas necesidades de las operaciones aéreas, se da en el ahorro costo eficiencia que produce al implementar un programa de confiabilidad efectivo.

En consecuencia, es pertinente desde la academia, analizar del desarrollo de este fenómeno que compromete a uno de los sectores de la economía que mayor afectación por la diseminación del virus denominado COVID-19 que, al convertirse en pandemia, generó la implementación a nivel mundial de medidas restrictivas para la movilidad de los habitantes a nivel mundial, manteniendo a los aviones en tierra durante un tiempo prolongado, generando costos adicionales de mantenimiento debido a la necesidad de preservar las aeronaves.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Estructurar un sistema de identificación, seguimiento y control que busque el mejoramiento de la confiabilidad técnica enfocado en fallas operacionales de una flota de aviones, adaptándolo a las necesidades de aerolíneas en Colombia.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

Establecer un estado del arte referente a la implementación de los programas de confiabilidad enfocado a fallas mecánicas con el fin de mejorar la eficiencia de las aeronaves.

Definir los parámetros requeridos para un sistema de identificación, seguimiento y control de un programa de confiabilidad técnica enfocado en fallas operacionales de una flota de aviones aplicable en aerolíneas comerciales colombianas.

Desarrollar un sistema de identificación, seguimiento y control de un programa de confiabilidad técnica enfocado en fallas operacionales de una flota de aviones aplicable en aerolíneas comerciales colombianas.

## **1.4 Marco de referencia**

### **1.4.1. Antecedentes**

Se realizó la consulta de investigaciones previas como tesis, proyectos, libros, publicaciones universitarias, informes y artículos de revistas indexadas, que contenían información sobre desarrollos de confiabilidad en general, y aplicaciones similares a la industria aérea militar y comercial.

Según el artículo científico “Un enfoque operativo novedoso para el mantenimiento de equipos: TPM y RCM trabajando juntos” presentan un nuevo enfoque operativo para el mantenimiento de equipos, diseñado con una alineación complementaria del mantenimiento productivo total (TPM) y el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), pues expresan que ambos carecen de una metodología estructurada que explote la naturaleza complementaria de los dos enfoques. Los autores proponen una “metodología de mantenimiento de equipos que puede adoptarse adecuadamente para definir un nuevo plan de mantenimiento o verificar y mejorar uno existente” (pág. 612), integrando principios y métodos de TPM y RCM, y exponiendo diferentes herramientas que pueden ser útiles para apoyar a los denominados “tomadores de decisiones y operadores”, además su aplicación no contempla restricciones sobre el grado o nivel de complejidad al sistema que se implementa.

La metodología de Braglia, Castellano & Gallo (2018) desarrolla tres pasos secuenciales principales:

El primero explota un modo de falla extendido, efectos y análisis de criticidad (FMECA) para lograr una descomposición funcional detallada del sistema en cuestión. El segundo establece la política de mantenimiento adecuada para cada modo de fallo mediante un diagrama de flujo de decisiones debidamente elaborado. Finalmente, el último paso está dedicado a la planificación e implementación de las actividades de mantenimiento identificadas de acuerdo con hojas de trabajo operativas específicas. (pág. 614)

Los autores Braglia, Castellano & Gallo (2018) comprueban y determinan basados en la implementación de su metodología que:

Este trabajo subraya aún más el papel estratégico que debe cubrir el mantenimiento en los sistemas de producción actuales. El mantenimiento debe incluirse en la estrategia de la empresa y los problemas correspondientes se tratan mejor cuando se incorporan temprano en el diseño del producto y del sistema de producción. (pág. 628)

La correcta ejecución de TPM y RCM se estructura enfatizando en las oportunidades existentes en las actividades de mantenimiento diarias realizadas por los operadores, y las necesidades de articular de manera efectiva enfoques y metodologías de mantenimiento

establecidos desde hace décadas y que pueden generar beneficios considerables a nivel operativo (Braglia, Castellano, & Gallo, 2018).

De acuerdo con el Proyecto de Grado “Mejora del proceso productivo de una aeronave con Análisis de Criticidad según RPN y Análisis Causa Raíz” de la Universidad de Sevilla, el Análisis de Modo de Fallo y Efectos es una metodología que llegó a emplearse incluso en los años 40 por las fuerzas armadas de los Estados Unidos. Sin embargo, no fue hasta su inclusión en el desarrollo aeroespacial que tuvo su auge, en la década de los 60, cuando se estudiaba enviar al hombre a la luna y lograr su retorno a salvo a la Tierra. Llegó incluso a recibir una especificación en la norma militar americana MIL-STD-16291 titulada Procedimientos para la realización de análisis de modos de fallo, efectos y criticidad. En la década de los 70 lo empezó a utilizar Ford, introduciéndolo en la industria Mejora del proceso productivo de una aeronave con Análisis de Criticidad según RPN y Análisis Causa Raíz automovilística y logrando que se extendiera más tarde al resto de fabricantes de automóviles. De hecho, actualmente es un método básico de análisis en dicho sector. A pesar de que en sus inicios el AMFE nació en el seno del ejército, pasando por la industria aeronáutica y la automovilística, hoy en día este método se ha extrapolado a muchas y diversas industrias, incluyendo la alimentaria o la informática. En la década del año 2000 Toyota avanzó un paso más en este método con su enfoque Design Review Based on Failure Mode (DRBFM), en español Revisión del diseño basado en los modos de fallo. Su inventor, el profesor Dr. Tatsuhiro Yoshimura, sabía que los problemas de diseño ocurrían cuando se hacían cambios sin el adecuado nivel de documentación de apoyo. Utilizando esa filosofía, quiso que los ingenieros llevaran a cabo una revisión creativa del diseño usando el AMFE (Pino, 2014).

Según el artículo científico “Metodología para el mantenimiento predictivo de transformadores de distribución basada en aprendizaje automático” (Alvarez, Lozano, & Bravo, 2022) “describen una metodología que se ha establecido para programar el mantenimiento predictivo de transformadores de distribución en el departamento del Cauca (Colombia) mediante aprendizaje automático, usada como técnica de clasificación debido a la naturaleza y volumen de los datos” (págs. 2-3). Viendo la necesidad de elaborar planes de mantenimiento que ayuden a evitar o disminuir el riesgo de falla, mejorar la calidad del servicio a los clientes y gestionar el uso de los recursos asignados al área de mantenimiento, desde una perspectiva orientada a recuperar el desempeño de los activos, incrementando su vida útil y mejorando los índices de confiabilidad.

El estudio fue aplicado a los datos suministrados por la Compañía Energética de Occidente, partiendo de un análisis de la información realizado mediante aprendizaje automático (Machine Learning), a partir de estudios netamente estadísticos y probabilísticos para identificar el plan de mantenimiento más adecuado (Alvarez, Lozano, & Bravo, 2022).

La metodología propuesta por Alvarez, Lozano & Bravo (2022) comprende una serie de pasos secuenciales que se estructuran de la siguiente forma:

Definición del alcance, definición del contexto operacional, identificación del universo de trabajo, identificación de los eventos de falla, identificación de las variables más representativas y relevantes para el sistema, construcción del modelo que represente al sistema, validación del modelo, predicción de falla del transformador, y por último se establece la formulación del plan de mantenimiento. (págs. 4-7)

Una vez definieron cada una de las características y parámetros para cada paso y con apoyo del algoritmo de predicción (Support Vector Machine) construyeron dos modelos de clasificación binaria de los transformadores (dañado o buen estado) para los años 2019 y 2020 (Alvarez, Lozano, & Bravo, 2022).

Posteriormente, para construir el modelo predictivo para el año 2021 usaron los datos del año inmediatamente anterior (datos de entrenamiento) que verificados con datos del 2019 al final del año 2020 el porcentaje de acierto de la variable de salida (transformadores quemados) fue del 90,62 %, validando así la capacidad predictiva del modelo de clasificación binaria (Alvarez, Lozano, & Bravo, 2022).

Por último, Alvarez, Lozano & Bravo (2022) afirman que:

La implementación de la metodología permite un ahorro del 13% en los gastos de mantenimiento correctivo para el año 2020. El modelo propuesto es una herramienta eficaz para la toma de decisiones, que proporciona una solución ideal para los problemas de programación del mantenimiento preventivo de los transformadores de distribución. (pág. 15)

De acuerdo con los fundamentos descritos en el Manual de Confiabilidad Aeronáutica de la Fuerza Aérea Colombiana, se tiene un proceso de confiabilidad que inicia con la gestión de la información, que consiste en recolectar, priorizar e identificar datos referentes a aeronaves, sistemas, componentes, operaciones y mantenimiento, con la finalidad de generar una valoración. También se ha determinado la necesidad de la validación de confiabilidad, para realizar el análisis de los datos del mantenimiento y operación, con el objetivo de identificar deficiencias que requieran acciones correctivas. Otro fundamento es la evaluación y seguimiento, el cual pretende realizar revisión y monitoreo a la implementación de recomendaciones, así como identificar si realmente existe un aumento de la confiabilidad y disponibilidad de los equipos aeronáuticos de la Fuerza Aérea Colombiana (Fuerza Aerea Colombiana, 2020).

Los tres componentes del proceso interactúan a través de una serie de entradas y salidas que en su conjunto constituyen el proceso de trabajo, estableciendo actividades, informes y un conjunto de normas y estándares a seguir para la confiabilidad.

La data de las fallas se considera la más esencial para el trabajo de Confiabilidad; por lo cual, es de suma importancia para convertirla en información de calidad y oportunidad, cualidades que se logran al momento de ingresarla al sistema, tal como ubicación funcional completa, momento de descubrimiento de la falla, descripción de la falla, fechas de inicio y corrección de la falla, efecto de la falla, etc. (Fuerza Aerea Colombiana, 2020).

La recopilación y documentación de la información, elaboración del registro de reportes, relación de resumen de la operación de aeronaves, análisis de confiabilidad de los sistemas, análisis del tiempo medio entre remociones no programadas, análisis de los incidentes significativos que haya sufrido la flota, reportes de mantenimiento excedidos, elaboración de la matriz de riesgo y elaboración de sugerencias de tareas de mantenimiento son actividades requeridas para realizar el estudio de confiabilidad a una flota de aeronaves. Dicho estudio se desarrolló mediante el análisis de los reportes de fallos de sistemas y componentes de una flota de aeronaves. Todos estos reportes fueron registrados en bases de datos para poder proceder al análisis de estos y encontrar tendencias en los perfiles de funcionamiento de los componentes. Se identificaron riesgos generados por la operación y se desarrolló un análisis causa-raíz para identificar el origen de las desviaciones en los perfiles de funcionamiento de los diferentes componentes. Al identificar los fallos y sus posibles

causas, se recomiendan diferentes tareas de mantenimiento para prevenir la ocurrencia de estos fallos (Ramirez, 2012).

Recientemente, los fabricantes de aviones están empezando a desarrollar poderosas herramientas de analítica que les permiten a los operadores aéreos identificar oportunamente fallas en sus flotas. Un ejemplo de esto es la empresa Airbus que brinda este tipo de servicios a través de la plataforma Skywise la cual puede interactuar con sus datos de manera intuitiva utilizando flujos de trabajo preconstruidos diseñados para mejorar su eficiencia operativa, evitar demoras y reducir los riesgos de AOG<sup>1</sup> (Aircraft on Ground). Uno de sus paquetes más promocionados es Skywise Predictive Maintenance el cual es una combinación de conocimientos de diseño de aeronaves y experiencia operativa de aerolíneas que se ejecuta en cantidades masivas de datos generados por la flota de Airbus. Este también proporciona alertas tempranas sobre la próxima degradación del sistema y el servicio requerido, respalda la planificación y el seguimiento de acciones preventivas, con el objetivo de anticipar fallas y reducir los riesgos de interrupciones operativas (<https://www.airbus.com/en>, 2022).

#### 1.4.2. Marco Conceptual

**Aeronavegabilidad:** Aptitud técnica y legal que deberá tener una aeronave para volar en condiciones de operación segura, de tal manera que: cumpla con su certificado tipo, exista la seguridad o integridad física, incluyendo sus partes, componentes y subsistemas, y que la aeronave

---

<sup>1</sup> El AOG, es el acrónimo de su término en inglés (Aircraft on Ground), lo que en español se traduce como avión en tierra. Es cuando una aeronave tiene un problema de mantenimiento que le impide volar o estar aeronavegable. Cuando este es el caso, las aeronaves comerciales no pueden volver al servicio hasta que sean reparadas, inspeccionadas y aprobadas.

lleve una operación efectiva en cuanto al uso (corrosión, rotura, pérdida de fluidos, etc.) (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2020, pág. 8).

**ATA:** Sistema estándar numérico diseñado para designar los sistemas de las aeronaves (p. ej, ATA 24: Sistema Eléctrico, ATA 28 Sistema de Combustible, ATA 36: Sistema Neumático, etc.), (<https://www.asap-aerospace.com>, 2022).

**Confiabilidad:** Es la capacidad de una máquina, equipo o sistema para cumplir funciones específicas o requeridas, bajo condiciones de operación dadas, en un tiempo o periodo determinado (Pérez, 2021, pág. 23).

**Disponibilidad:** Función que permite calcular el porcentaje de tiempo en el cual una máquina o equipo está disponible para cumplir la función para la cual fue diseñado y construido. Esto no implica necesariamente que esté operando o funcionando, sino que se encuentra en óptimas condiciones de operar (Pérez, 2021, pág. 23).

**Efectividad:** Establece la trascendencia de los objetivos planteados y el grado en que se deben alcanzar. (Gutierrez, 2010, pág. 21). Capacidad de lograr el resultado deseado. Un indicador de la efectividad del mantenimiento programado es la disponibilidad de su aeronave para vuelos u operaciones (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2018, pág. 1.3).

**Efectos de la falla:** Son aquellos que describen qué pasa cuando ocurre un modo de falla (Moubray, 2004, pág. 76).

**Eficacia:** Es el grado en que se realizan las actividades planeadas y se alcanzan los objetivos trazados (Gutierrez, 2010, pág. 21).

**Eficiencia:** Relación existente entre el resultado alcanzado y los recursos utilizados (Gutierrez, 2010, pág. 21).

**Evento de falla:** Aquella situación que se puede presentar anómala de carácter técnico detectada en un equipo (Pérez, 2021, pág. 23).

**Falla funcional:** Situación dada que afecta la capacidad de un equipo de cumplir su función (Pérez, 2021, pág. 23).

**Función:** La operación de un elemento de una manera prevista o particular para lograr un estado o resultado deseado (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2018, pág. 1.3).

**Mantenimiento Centrado en Confiabilidad:** Proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual (Moubray, 2004, pág. 7).

**Mantenimiento Correctivo:** Es el ejecutado cuando una máquina o equipo deja de operar, porque se presenta una o más fallas o averías detectadas y su objetivo es poner en marcha su funcionamiento, afectando lo menos posible la productividad (Pérez, 2021, pág. 37).

**Mantenimiento Predictivo:** Consiste en una serie de técnicas y operaciones que se adoptan para detectar una falla o problema en un elemento, equipo o instalación antes de que suceda, con el objeto de poder corregirla sin que se produzcan detecciones de producción, averías o accidentes (Jiménez, 2015, pág. 31).

**Mantenimiento Preventivo:** Se fundamenta en una serie de actividades planificadas que se llevan a cabo dentro de periodos definidos, diseñado con el objetivo de garantizar que los activos de la compañía cumplan con las funciones requeridas dentro del entorno de operaciones para optimizar la eficiencia de los procesos, para prevenir y anticiparse a las fallas de los elementos, componentes, máquinas o equipos (Pérez, 2021, pág. 39).

**Mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM):** Establece el proceso de las tareas de mantenimiento programado (preventivo) tratando de eliminar las causas de las fallas (proactivo), sobre las bases del conocimiento del estado de los equipos (predictivo), para lo cual conlleva una continua búsqueda de información y conocimiento, que promueva la mejora de la confiabilidad del activo, motivando la mejora continua y la mayor eficiencia de los equipos e instalaciones (Cárcel, 2016, pág. 72).

**Mantenimiento total productivo (TPM):** Es un modelo cuyo planteamiento opera sobre la gestión de los activos físicos, y que entiende como básica la implicación del operario como responsable de la calidad del producto y la fiabilidad operativa (Cárcel, 2016, pág. 71).

**Modo de falla:** Es cualquier evento que causa una falla funcional (Moubray, 2004, pág. 56).

**MSG:** Maintenance Steering Group o Grupo de dirección de mantenimiento en español. Proporciona un proceso que se utiliza para desarrollar tareas e intervalos de mantenimiento programados, que serán aceptables para las autoridades reguladoras, los operadores y los fabricantes (<https://sassofia.com>, 2022)

**Nivel inherente de confiabilidad:** El nivel teórico de confiabilidad establecido por los criterios de diseño y fabricación de un artículo. Este es el nivel más alto de confiabilidad que se puede esperar de una unidad, sistema o aeronave. Alcanzar niveles más altos de confiabilidad generalmente requiere modificaciones o rediseños (FAA, 2018, págs. 1-4).

**Operador de transporte aéreo:** Operador de una aeronave involucrada en servicios aéreos comerciales de transporte público regular o no regular de pasajeros, correo o carga (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2020, pág. 61).

**Programa Efectivo:** es aquel que programa solo aquellas tareas necesarias para cumplir con los objetivos establecidos. No programa tareas adicionales que aumenten los costos de mantenimiento sin un aumento correspondiente en la protección del nivel inherente de confiabilidad (Higgins, Mobley, & Wikoff, 2008).

**Seguridad Operacional:** Es el estado en que el riesgo de lesiones a las personas o daños a los bienes se reduce y se mantiene en un nivel aceptable, o por debajo del mismo, por medio de un proceso continuo de identificación de peligros y gestión de riesgos (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2020, pág. 72).

**Severity Index (SI):** Es un medio para ponderar la severidad de las interrupciones según su efecto en las operaciones (Government of Canada, 2019).

### 1.4.3. Marco teórico

“La confiabilidad es la probabilidad de que un componente desempeñe satisfactoriamente la función para la que fue creado durante un periodo establecido y bajo condiciones de operación establecidos” (Reyes Aguilar, 2006). En este sentido, el desarrollo de la investigación debe permitir establecer cuáles han sido las dificultades existentes, en el campo de la aviación comercial, para implementar sistema de identificación, seguimiento y control de confiabilidad técnica en operadores aéreos en Colombia.

Para ahondar en el concepto de confiabilidad, es necesario conocer cómo nació esta área a partir del concepto de mantenimiento de procesos, equipos y componentes.

Así pues, el desarrollo del mantenimiento se puede rastrear en tres etapas generacionales las cuales se describen a continuación:

**Primera Etapa.** La primera generación del mantenimiento abarca hasta el inicio de la segunda guerra mundial. Este periodo se caracteriza principalmente por procesos en la industria en mayoría artesanales, en el cual la mecanización era básica y no se consideraba relevante. Por tanto, la confiabilidad de los equipos, así como la prevención de sus fallos no suponía una gran preocupación para la gerencia; también por que los equipos y productos eran diseñados de manera simples de buena calidad lo que por defecto los hacia confiables y de arreglo practico. En este sentido no se requería de un plan o programa de mantenimiento riguroso recurrente, que pasara de un servicio de limpieza y lubricación (Moubray, 2004).

**Segunda Etapa.** Los cambios fueron substanciales desde la segunda guerra mundial. El esfuerzo de guerra hizo que se incrementara la necesidad de toda clase de materiales, entre tanto la mano de obra se estaba viendo significativamente disminuida, conllevando a un mayor empleo de máquinas para la elaboración de productos. Sobre la mitad del siglo pasado, los procesos mecanizados aumentaron significativamente, por tanto, el uso de varias clases de maquinaria, entre estas algunas especializadas, se había vuelto intensivo (Moubray, 2004).

Es así, que el estado y funcionamiento de la maquinaria condiono a la industria, por lo cual se empezó a pensar en la gestión de la inactividad de la maquinaria, en función de la prevención de incidencias y/o fallas técnicas, dando nacimiento al mantenimiento preventivo, que para para

los años 60 se trataba de actividades para actualizar y acondicionar equipos en periodos definidos (Moubray, 2004).

Respecto a los costos operativos, el costo de mantenimiento se comenzó a observar como uno de los más representativos, lo que llevó a la necesidad de implementar la planeación y control de este. Como resultado, los recursos invertidos en artículos, así como los altos costos, se planteó el reto a las industrias para buscar incrementar al máximo el ciclo de vida de estos bienes (Moubray, 2004).

**Tercera Etapa:** La inactividad operativa de las maquinas y/o componentes, repercute en el rendimiento y productividad de las industrias, incrementando los costos y afectando las expectativas de servicio que espera el mercado. Esto es factor adverso, visible en varias industrias como la del transporte y la de manufactura. Es evidente que la inactividad hoy en día trae retos complejos para la industria, aun mas con la implementación de sistemas exactos, por ende, complejos, los cuales con fallas esporádicas condicionan la operación de una fábrica (Moubray, 2004).

En este sentido las incidencias y/o fallas en los sistemas serán aspectos críticos que tienen consecuencias en la seguridad y en el medio ambiente, más en una era donde los desafíos en estos aspectos son muy exigentes en todo el mundo y, determinan la viabilidad o cierre de operaciones de una compañía que es incapaz de garantizarlas a las comunidades. Dicho esto, las dimensiones respecto a la confiabilidad e integralidad de los bienes, se hace mucho más amplia, indistintamente de los factores de costo de operación, convirtiéndose en un tema relevante y que determina la sostenibilidad de las organizaciones (Senge, 1994).

Paralelamente se incrementaron los costos de operación, adquisición y necesidad de bienes, haciendo de estos últimos algo indispensable para los procesos productivos, por lo cual fue necesario sacar el mayor beneficio de ellos, empleándolos eficientemente durante su vida útil. Como resultado los costos de mantenimiento están aumentando per se, equitativamente haciendo parte de los gastos globales. En algunos sectores empresariales, este se muestra como el segundo e incluso como el mayor gasto entre los costos operativos. En consecuencia, en los últimos años se posicionó el concepto de mantenimiento y confiabilidad, de un lugar sin importancia, a hacer parte hoy en día, de un rubro de relevancia en el control de costos (Moubray, 2004).

El Mantenimiento busca asegurar que los bienes físicos/máquinas continúen cumpliendo las funciones que sus usuarios esperan. El cumplimiento de dichas expectativas dependerá de dónde y cómo el bien está siendo utilizado operativamente. Esto conlleva a la siguiente definición de Mantenimiento Basado en la Garantía de Funcionamiento, el cual corresponde al proceso empleado para establecer qué acciones deben tomarse a fin de asegurar que todo bien físico se mantenga funcional, como sus usuarios lo esperan, en un escenario operativo (Moubray, 2004).

El método de RCM, en primer lugar, identifica las situaciones que llevaron al fallo. Posteriormente cuestiona qué eventos pueden causar que el bien falle. No obstante, se ha de tener presente que para este proceso un fallo ocurre cuando el activo no puede cumplir aquello que sus usuarios quieren que haga. Así pues, puede abarcar desde la incapacidad total de funcionar, hasta fallos parciales en los que el activo aún funciona, pero a un nivel que no es aceptable por el usuario (Moubray, 2004).

Según J Moubray (2004), el proceso de RCM conlleva la formulación de siete preguntas acerca del activo en cuestión:

1) ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional? Una función consiste en un verbo, un objeto y el estándar de funcionamiento deseado por el usuario. Además, el deterioro es inevitable, por lo que debe ser tolerable y ello ha de reflejarse en las funciones. En general, deben evitarse funciones cualitativas del tipo "funcionar lo mejor posible", pues de esta manera no se puede definir con exactitud cuándo falla el activo. No obstante, a veces resulta imposible utilizar únicamente funciones cuantitativas. Por ejemplo, al pintar un activo (Moubray, 2004).

2) ¿De qué manera no cumple con sus funciones? Antes de poder contestar a esa pregunta, se ha de conocer quién debe establecer los estándares. En la mayoría de los programas de mantenimiento que hay en uso por todo el mundo, esto es llevado a cabo por el personal de mantenimiento, quienes debido a sus conocimientos son los que deciden qué se entiende por "fallo". Establecidos los estándares, se registran todos los fallos funcionales asociados con cada función del punto anterior, recordando que un fallo funcional es la incapacidad de cualquier activo físico de cumplir una función según un parámetro de funcionamiento aceptable para el usuario (Moubray, 2004).

3) ¿Cuál es la causa de cada fallo funcional? Para cada fallo funcional, se incluyen modos de fallo (o causas del fallo). Los modos de fallo deben definirse con el suficiente detalle como para que pueda seleccionarse una adecuada política de manejo de este. En general, el nivel de detalle empleado está directamente relacionado con el nivel en el cual se lleva a cabo el AMFE: un análisis a muy alto nivel (por ejemplo: todo el avión) termina siendo muy superficial, mientras que uno hecho a un nivel muy bajo se vuelve inmanejable e ininteligible. Entonces... ¿Qué nivel se emplea? Un determinado elemento puede fallar por diversos motivos; no obstante, cuando se trata de un grupo de elementos o un sistema entero, este puede fallar por cientos de razones, y en el caso de toda una planta, los números ascienden a miles o incluso decenas de miles. Un nivel bajo implica un nivel difícil de definir y de analizar las consecuencias de los fallos (a más bajo, más difícil). Además, se puede caer en el error de analizar varias veces el mismo modo de fallo de distintas formas que son levemente diferentes. Un análisis de nivel alto, por el contrario, conlleva funciones más fáciles de definir y analizar las consecuencias de los fallos. Además, hay menos repetición de funciones y de modos de fallo. Sin embargo, la principal desventaja es que hay multitud de modos de fallo que podrían hacer que, por ejemplo, el avión no funcione: desde un fallo estructural de la aeronave hasta un sistema crítico inactivo. Con todo ello en mente, es lógico emplear un nivel intermedio. Sin embargo, en estos niveles a veces se generan igualmente demasiados modos de fallo por función, sobre todo en funciones mejora del proceso productivo de una aeronave con Análisis de criticidad según RPN y Análisis Causa Raíz primarias. Como solución usual a seguir, se suele agrupar todo un subconjunto, como un único fallo simple, o emplear únicamente las más dominantes (Moubray, 2004).

4) ¿Qué sucede cuando ocurre cada fallo? A modo descriptivo, se suele añadir el efecto asociado a cada fallo (es decir, el qué sucede cuando ocurre un determinado fallo) (Moubray, 2004).

5) ¿En qué sentido es importante cada fallo? Según el enfoque del RCM, las consecuencias del fallo describen la importancia de este. Por tanto, si las consecuencias son graves se pondrá especial esfuerzo en evitarlos, minimizarlos o incluso eliminarlos mediante alguna acción proactiva, mientras que si las consecuencias son leves, puede que no se tomen medidas y simplemente se repare el fallo cuando ocurra. En resumen: acorde al enfoque del RCM, una

tarea proactiva merece la pena si reduce las consecuencias del modo de fallo asociado a un grado tal que justifique los costos directos e indirectos de hacerlo (Moubray, 2004).

6) ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada fallo? El proceso del RCM diferencia entre las funciones evidentes y las funciones ocultas, según el fallo se haga o no (respectivamente) evidente por sí solo, inevitablemente y con el tiempo, a los operarios en circunstancias normales. Aunque según el enfoque RCM se puede profundizar aún más en la clasificación de funciones evidentes y ocultas (Moubray, 2004).

7) ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada? De no encontrarse una tarea proactiva adecuada, la descripción del fallo y su efecto indicará qué acción deberá ser tomada. Este tipo de acciones incluyen búsqueda de fallo, rediseño y mantenimiento a rotura (Moubray, 2004).

En general, y más en un proceso RCM empleado exhaustivamente, se defiende un mantenimiento proactivo, lo cual implica conocer los diferentes modos de fallo antes de que ocurran (es decir, conocer los riesgos asociados al proyecto), así como la forma en que deberían ser manejados en el supuesto de que ocurriesen. Así pues, se han de identificar todos los modos de fallo que puedan afectar al activo, hayan ocurrido o no, siendo de hecho un caso ideal el identificar un modo de fallo antes de que ocurra para poder tomar las medidas correspondientes en caso de suceder (Moubray, 2004).

Por otro lado, paralelamente, estaban naciendo las técnicas de Resolución Práctica de Problemas (PPS<sup>2</sup>), que es una metodología nacida en la compañía fabricante de automotores Toyota, la cual se utiliza para tomar una acción correctiva y prevenir más fallos, ayudando a encontrar su origen y así poder eliminar el problema recurrente. Por temas de costes, solo se tratan los fallos repetitivos o que tienen un alto impacto; de no ser así, debe bastar con arreglar el fallo experimentado al no ser grave o no esperar una alta frecuencia del mismo. Por tanto, resulta evidente que es una metodología muy útil para aplicar con aquellos riesgos de mayor RPN o criticidad y los cuales, en general, se desconoce su origen o, empleando adecuadamente las técnicas del PPS, se descubre un origen a un nivel superior. Por ejemplo, un fallo relacionado con

---

<sup>2</sup> El PPS, es el acrónimo de su término en inglés (Practical Problem Solving), lo que en español se traduce como resolución práctica de problemas.

una mala función de un equipo electrónico pudiera llegarse a dar con que tiene su origen en una incorrecta conexión de cableado, llegando a pensar que ha habido un error humano por descuido o falta de formación. Sin embargo, ahondando más aún con el PPS, se podría descubrir que el verdadero origen del problema está en la orden de montaje que se entrega a los operarios y que, por error, indica un montaje con un conexionado incorrecto (Moubray, 2004).

#### **1.4.4. Marco Normativo**

No existe un requisito o marco regulatorio que obligue a un operador aéreo que deba tener o mantener un programa de confiabilidad. Sin embargo, si un operador decide usar un programa de confiabilidad, se deben tener en cuenta ciertas reglamentaciones, especificaciones operativas y requisitos.

##### **Normativa Internacional**

Lo establecido por la normatividad vigente y las normas internacionales de aviación:

- D072, Aircraft Maintenance—Continuous Airworthiness Maintenance Program (CAMP) Authorization.
- D074, Reliability Program Authorization: Entire Aircraft.
- D075, Reliability Program Authorization: Airframe, Powerplant, Systems or Selected Items.
- D079, Reliability Program Contractual Arrangement Authorization.
- D088, Maintenance Time Limitations Authorization.

##### **Normativa Colombiana**

Lo establecido por la normatividad vigente y las normas internas de la aeronáutica civil:

- Constitución Política de Colombia.
- Decreto N° 194 de 2021. “Por el cual se modifica la estructura de la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil — Aerocivil.”

- RAC- 135. Requisitos de operación - operaciones domésticas e internacionales regulares y no regulares. Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil Oficina de Transporte Aéreo - Grupo de Normas Aeronáuticas. Enmienda 3, Noviembre 2021.
- RAC- 121. “Requisitos de operación – operaciones nacionales e internacionales” en remplazo de las disposiciones que existían al respecto en la Norma RAC 4. Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil Oficina de Transporte Aéreo - Grupo de Normas Aeronáuticas. Enmienda 5, Septiembre 2022.

## 1.5 Metodología

De acuerdo con Hernandez Sampieri (2014), Si la recopilación de la literatura se realiza mediante compilaciones o bancos de datos en los que se incluye un breve resumen de cada referencia, se corre menos riesgo de elegir una fuente primaria inútil. De esta forma en todas las áreas de conocimiento, las fuentes primarias más consultadas y utilizadas para elaborar marcos teóricos son libros, artículos de revistas científicas y ponencias o trabajos presentados en congresos, simposios y eventos similares, entre otras razones, porque estas fuentes son las que sistematizan en mayor medida la información, profundizan más en el tema que desarrollan y son altamente especializadas, además de que se puede tener acceso a ellas por internet. Así, Creswell (2013) recomienda confiar en la medida de lo posible en artículos de revistas científicas, que son evaluados críticamente por editores y dictaminadores expertos antes de ser publicados.

Por lo anterior, la recopilación de información de la industria y las diferentes autoridades de aviación civil e internacional, junto con análisis fundamental del rendimiento estándar de aeronaves, son la base fundamental de este anteproyecto; siendo esta una metodología de investigación mixta.

La información para este trabajo se recaba mediante la literatura, textos, tesis, trabajos de investigación en medio físico y digital, lo cual permite hacer una caracterización detallada de la evolución de los conceptos de confiabilidad, así como una descripción de técnicas y metodologías implementadas en varias industrias, revisando como se articula este concepto en la gestión de los procesos y sistemas de las organizaciones.

Con lo anterior, se procedió a delimitar la información y material recopilado, de manera tal que las fuentes seleccionadas, objeto de consultas, revisión y fundamentos, se relacionen específicamente con la evolución de las metodologías y técnicas de confiabilidad, del sector aeronáutico, desarrollo del sector de la aviación comercial y su crecimiento en Colombia.

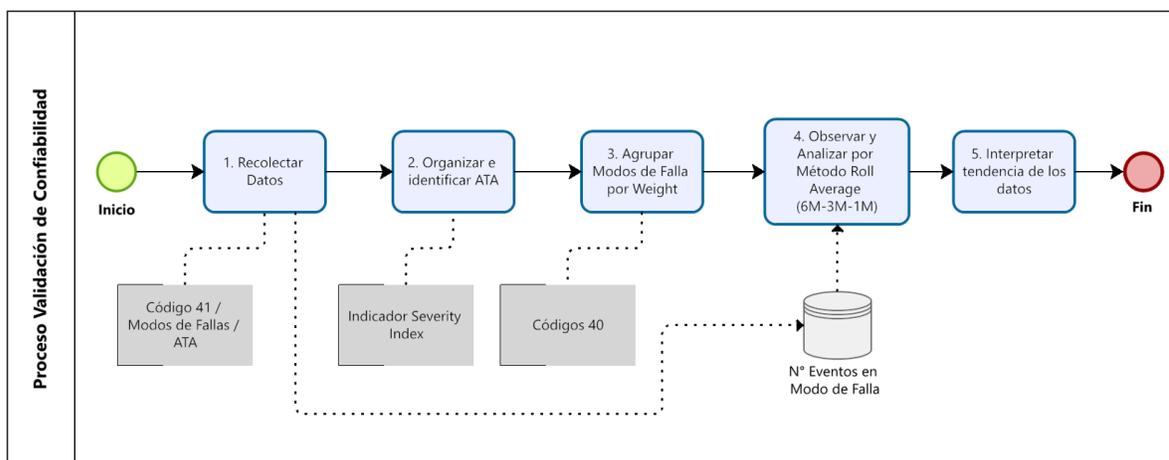
Una vez acotado el sector aeronáutico y los conceptos de confiabilidad definidos, se da paso a definir el alcance del proceso para valorar la confiabilidad, estableciendo objetivos, reglas y parámetros en los que se realizará la revisión, datos de entrada, conceptos complementarios, variables a estudiar, magnitudes y periodicidad de la evaluación.

Seguidamente, se procede a recabar los datos documentados de reportes de fallos, describiendo los eventos relacionados con la confiabilidad de las aeronaves durante el periodo que se va a valorar, especialmente los procesos correspondientes a mantenimiento y fallos de la aeronave.

Los datos transformados en información a través del proceso de valoración de confiabilidad deberán establecer las actividades para la prevención y la corrección de los fallos presentados en las aeronaves durante su operación. El proceso de valoración de confiabilidad contemplará el análisis por sistemas del avion (p. ej. Motor, Eléctrico, Hidráulico, etc.) a fin de determinar cuál de estos sistemas es el más crítico en la seguridad del vuelo de las aeronaves y su afectación en la operación, detectado que elementos de ese sistema son los que están mostrando fallas en sus aristas de funcionamiento.

En la Figura 2 se presenta el proceso diseñado, el cual agrupa las fases que van desde la colección de los datos hasta la interpretación de los mismos.

Figura 2. Proceso General Valoración de Confiabilidad



Fuente: Elaboración propia, 2022

El proceso en su especificidad para valorar la Confiabilidad se estará describiendo metodológicamente en el desarrollo del presente trabajo, mientras se explican conceptos básicos de aviación y confiabilidad con argot aeronáutico que se encontrara descritos en el marco conceptual y a lo largo del documento.

### 1.6 Alcance

El alcance de este trabajo va desde la evaluación de modelos teóricos de confiabilidad de acuerdo con referentes documentales de la industria aeronáutica y recomendaciones de autoridades de aviación, hasta proponer un sistema de identificación, seguimiento y control que busque el mejoramiento de la confiabilidad técnica enfocado en fallas operacionales de una flota de aviones, adaptándolo a las necesidades de aerolíneas en Colombia.

## **2. Estado del arte referente a la implementación de los programas de confiabilidad técnica enfocado en fallas operacionales de una flota de aviones**

Con base en los siguientes estudios e investigaciones sobre confiabilidad y aeronaves, se enmarca el presente proyecto debido a su aporte sobre el desarrollo de la industria de aviación en el mundo.

Para hablar sobre la implementación de los programas de confiabilidad y sus beneficios frente a la productividad, aeronavegabilidad y eficiencia de los programas de mantenimiento, primero se debe ahondar en el mantenimiento y sus inicios como un estado del arte, ya que de este nace la necesidad de la implementación de los programas de confiabilidad para mejorar la seguridad de los vuelos y la rentabilidad de las aerolíneas.

"... el mantenimiento es una ciencia ya que su ejecución se basa, tarde o temprano, en la mayoría o en todas las ciencias. Es un arte porque problemas aparentemente idénticos exigen y reciben regularmente enfoques y acciones diferentes y porque algunos gerentes, capataces y mecánicos muestran mayor aptitud para ello que otros muestran o incluso alcanzan. Es sobre todo una filosofía porque es una disciplina que se puede aplicar de manera intensiva, modesta o nula, dependiendo de una amplia gama de variables que trascienden frecuentemente las soluciones más inmediatas y obvias." (Higgins, Mobley, & Wikoff, 2008, pág. 2)

“Al final de los 1950s, la aviación comercial mundial estaba sufriendo más de 60 accidentes por millón de despegues. Si actualmente se estuviera presentando la misma tasa de accidentes, se estarían comunicando dos accidentes aéreos diariamente en algún sitio del mundo (involucrando aviones de 100 pasajeros o más)”, (Perez, 2003, pág. 1).

Dos tercios de los accidentes ocurridos al final de los 50s eran causados por fallas en los equipos. Esta alta tasa de accidentalidad, conectada con el auge de los viajes aéreos, significaba que la industria tenía que empezar a hacer algo para mejorar la seguridad (Perez, 2003).

“El hecho de que una tasa tan alta de accidentes fuera causada por fallas en los equipos significaba que, al menos inicialmente, el principal enfoque tenía que hacerse en la seguridad de

los equipos. En esos días, “mantenimiento” significaba una cosa: reparaciones periódicas. Todos esperaban que los motores y otras partes importantes se gastaran después de cierto tiempo” (Perez, 2003, pág. 1).

Sin embargo, esto condujo a que se creyera que:

Las reparaciones periódicas retendrían los componentes antes de su desgaste y así prevenir fallas. Cuando la idea parecía no estar funcionando, cada uno asumía que ellos estaban realizando muy tardíamente las reparaciones: después de que el desgaste se había iniciado. Naturalmente, el esfuerzo inicial era para acortar el tiempo entre reparaciones. Cuando hacían las reparaciones, los gerentes de mantenimiento de las aerolíneas hallaban que, en la mayoría de los casos, los porcentajes de falla no se reducían y por el contrario se incrementaban. (Perez, 2003, pág. 1)

Finalmente, La historia de la transformación del mantenimiento en la aviación comercial se designa como sigue.

Desde un cúmulo de supuestos y tradiciones hasta llegar a un proceso analítico y sistemático que hizo de la aviación comercial “La forma más segura para viajar” es la historia del RCM. El RCM es uno de los procesos desarrollados durante los 1960s y 1970s, en varias industrias con la finalidad de ayudar a las personas a determinar las mejores políticas para mejorar las funciones de los activos físicos y para manejar las consecuencias de sus fallas. (Perez, 2003, pág. 2)

## **2.1 Reflexión sobre el estado del arte actual**

La confiabilidad se define como la probabilidad de realizar todas las funciones (incluidas las funciones de seguridad) satisfactoriamente durante un tiempo específico y condiciones de uso específicas. Las funciones y condiciones de uso vienen de la especificación. Si una especificación falla o es vaga el 60% o más del tiempo, las predicciones de confiabilidad tienen muy poco valor. El segundo gran problema es: ¿cuántas fallas deberían ser tolerables? Es posible que algunos lectores no estén de acuerdo en que podemos diseñar para cero fallas críticas, pero la evidencia respalda la conclusión contraria (Raheja, 2012, pág. 2).

Es por esta razón que la aviación maneja cierto nivel de perfección, sin darse el lujo de esperar a que una falla grave ocurra, y por esta razón se diseñan los sistemas del avión con redundancia por si ocurre, aunque, esto no quiera decir que no habrá consecuencias operacionales, las cuales desde este proyecto se buscan reducir.

El nivel de perfección del que se habla también puede denominarse la confiabilidad del sistema como lo indica Kinnison (2013), “el nivel de perfección diseñado se conoce como la confiabilidad inherente de ese sistema. Esto es lo mejor que obtiene el sistema durante la operación en el mundo real. Ninguna cantidad de mantenimiento puede aumentar la confiabilidad del sistema más allá de este nivel inherente. Sin embargo, es deseable que el operador mantenga este nivel de confiabilidad (o este nivel de perfección) en todo momento”.

Por otro lado, Raheja (2012) también indica que la ciencia de la confiabilidad no ha seguido el ritmo de las expectativas de los usuarios ya que muchas corporaciones todavía usan el MTBF<sup>3</sup> (tiempo medio entre fallas) como una medida de confiabilidad, lo que, según la distribución estadística de los datos de fallas, implica la aceptación de aproximadamente 50 a 70% de fallas durante el tiempo indicado por un MTBF. Ningún usuario hoy en día puede tolerar un número tan alto de fallas. Idealmente, un usuario no quiere fallas durante toda la vida esperada, la mayoría de las empresas comerciales, como los fabricantes de dispositivos médicos y automotrices, han dejado de usar la medida MTBF y apuntan a fallas del 1 al 10 % durante un tiempo autodefinido. Esto todavía no está en línea con los sueños de los usuarios, por lo cual, la verdadera pregunta es: ¿Por qué no diseñar para cero fallas si podemos aumentar las ganancias y ganar más participación de mercado? Sin embargo, cero fallas implica que no existan fallas de misión crítica o ninguna falla del sistema críticas para la seguridad. Como mínimo, los sistemas en los que las fallas pueden tener consecuencias catastróficas deben diseñarse para cero fallas y algunos ejemplos de empresas que son capaces de hacer esto son Toyota, Apple, Gillette, Honda, Boeing, Johnson & Johnson, Corning y Hewlett Packard.

---

<sup>3</sup> El MTBF, es el acrónimo de su término en inglés (Main Time Between Fault), lo que en español se traduce como tiempo medido entre fallas.

## 2.2 Reducción de costos de mantenimiento y la confiabilidad

La confiabilidad mejorada da como resultado menores costos de mantenimiento. Si los activos no se están descomponiendo, se puede realizar un mayor porcentaje del trabajo de mantenimiento de manera planificada y programada, lo que permite que la fuerza de trabajo sea al menos el doble de eficiente. La reducción de estas pérdidas también resultará en el requisito de menos repuestos, menos horas extra y menos contratistas. Todo esto resulta en reducciones significativas en el gasto de mantenimiento. No es inusual que las organizaciones experimenten una reducción de hasta el 50%, en el costo de mantenimiento como resultado de pasar de un estilo de gestión reactivo a un enfoque proactivo. (Higgins, Mobley, & Wikoff, 2008)

El concepto de costo de confiabilidad (COR<sup>4</sup>) según Higgins, Mobley & Wikoff (Higgins, Mobley, & Wikoff, 2008) establece que:

El costo total en que incurre un fabricante durante el período de diseño, fabricación y garantía de un producto con una confiabilidad dada y puede desarrollarse en torno a la noción generalmente aceptada de costo de calidad (COQ<sup>5</sup>). Los principios de COQ, establecidos en la década de 1950, han sido verificados y encontrados válidos en todos los segmentos de la industria manufacturera. El COQ se aplica para medir el estado económico de la calidad, para identificar oportunidades de mejora de la calidad, para verificar la eficacia y para documentar el impacto de los programas de mejora de la calidad. La contabilidad de COQ trata de identificar todos los elementos de costo asociados con defectos en productos y procesos y luego contrastarlos con el costo de hacer y permanecer en el negocio. (pág. 16.2.1)

También existen algunos peligros y trampas asociados con el uso de COQ y COR.

Los gerentes a menudo olvidan que COQ y COR son variables dependientes que reflejan los éxitos y fracasos de los programas de calidad y confiabilidad. Al hacerlo, corren el riesgo de degradar los niveles de confiabilidad para lograr ahorros de costos a corto plazo. Otros posibles peligros son causados por la identificación, a menudo difícil, de la causa del

---

<sup>4</sup> El COR, es el acrónimo de su término en inglés (cost of reliability), lo que en español se traduce como costos de confiabilidad

<sup>5</sup> El COQ, es el acrónimo de su término en inglés (cost of quality), lo que en español se traduce como costo de calidad.

defecto, los conflictos que surgen de las reglas de transferencia de cargos de costos, la preocupación por los sistemas de informes, las tendencias hacia el perfeccionismo, etc. Para prevenir estos y otros escollos, se requiere prudencia y conocimiento gerencial en la búsqueda de hechos, comprensión, objetivos realistas, prioridades con planes de ejecución racionales y monitores de progreso. (Higgins, Mobley, & Wikoff, 2008, pág. 16.2.1)

### **2.3 Incremento de la seguridad del vuelo**

La estrecha relación entre la confiabilidad y los problemas de seguridad del producto es evidente a partir de una simple definición de riesgo, expresado mediante la Ecuación 1.

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad de una falla} \times \text{exposición} \times \text{consecuencia}$$

Ecuación 1. Cuantificación del riesgo

Fuente: (Higgins, Mobley, & Wikoff, 2008)

Los resultados obtenidos mediante técnicas de análisis de árbol de fallas, modos de falla y análisis de efectos, o análisis de peligros, pueden interpretarse en términos de utilidad negativa, probabilidades de eventos y severidad (criticidad), que son temas estándar de los estudios de costo-beneficio. El factor costo, fuertemente dependiente del nivel de criticidad, debe tener en cuenta el costo del diseño para la seguridad, la fabricación para la seguridad y las pérdidas causadas por quejas, reclamos, demandas, costos legales, publicidad desfavorable, intervención gubernamental, etc. (Higgins, Mobley, & Wikoff, 2008)

### **2.4 Efectos de la confiabilidad en el mantenimiento**

Para poder hablar de los efectos de la confiabilidad sobre los programas de mantenimiento y su evolución, se debe hablar primero de las filosofías MSG (Maintenance Steering Group); MSG-2 y MSG-3, las cuales tiene su origen como su predecesora MSG-1, después de la segunda guerra mundial y fueron adoptadas por la necesidad de mantener las aeronaves óptimas para el vuelo, debido a que, en medio de la guerra su enfoque era la producción en masa para poder suplir la demanda de aviones, por lo cual se enfocaba en las prestaciones de las aeronaves y su rendimiento en el campo de acción para el cual eran diseñadas, pero que tarde o temprano tendrían que cambiar, ya que de nada serviría el rendimiento, si las aeronaves no podían mantenerse en vuelo.

Los programas de mantenimiento actualmente en uso en la aviación comercial.

Fueron desarrollados por la industria utilizando dos enfoques básicos: el enfoque orientado a procesos y el enfoque orientado a tareas. Las diferencias en estos dos métodos son la actitud hacia las acciones de mantenimiento y la manera en que se determinan y asignan las acciones de mantenimiento a los componentes y sistemas. Aunque la industria de la aviación comercial se ha pasado recientemente al enfoque orientado a tareas para los modelos de aviones más recientes, todavía hay muchos aviones más antiguos en servicio cuyos programas de mantenimiento se desarrollaron mediante el enfoque orientado a procesos. (Kinnison & Siddiqui, 2013, pág. 2.1)

El enfoque de mantenimiento orientado a procesos utiliza tres procesos principales de mantenimiento para llevar a cabo las acciones de mantenimiento programadas.

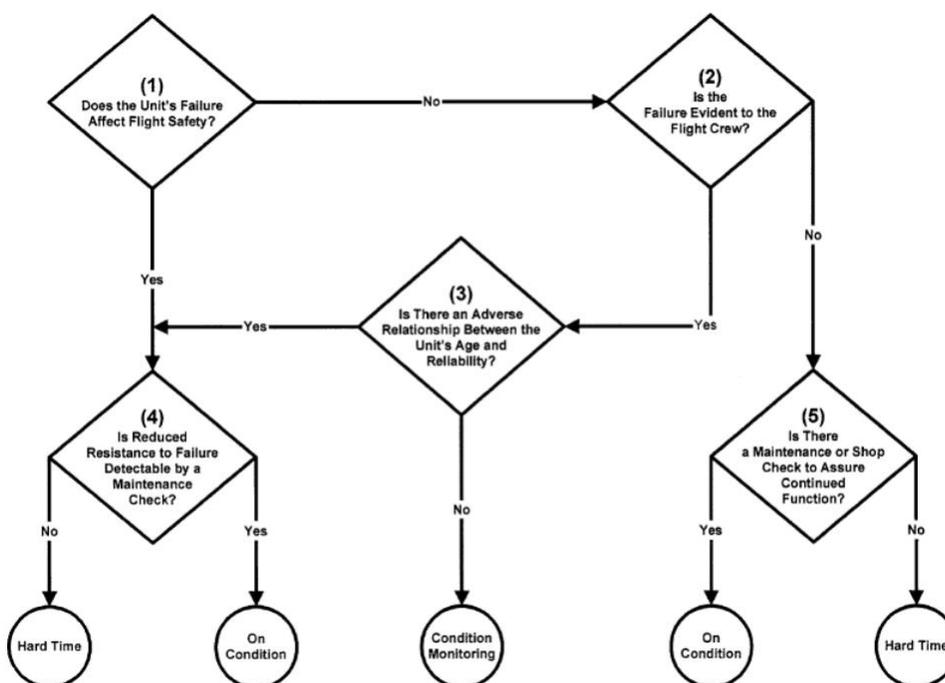
Estos procesos se denominan Hard Time (HT), por condición (OC) y monitoreo de condición (CM). Los procesos de Hard Time y bajo condición, se utilizan para componentes o sistemas que, respectivamente, tienen límites de vida definidos o períodos de desgaste detectables. El proceso de monitoreo de condición se utiliza para monitorear sistemas y componentes que no pueden utilizar los procesos HT u OC. Estos elementos de CM funcionan hasta el fallo y realizan un seguimiento de las tasas de fallo para ayudar en la predicción de fallos o en los esfuerzos de su prevención. Estos son los elementos de "funcionamiento hasta que ocurra la falla". (Kinnison & Siddiqui, 2013, pág. 2.1)

“El enfoque de mantenimiento orientado a tareas utiliza tareas de mantenimiento predeterminadas para evitar fallas en servicio. Las redundancias de equipos a veces se utilizan para permitir que ocurran fallas en servicio sin afectar negativamente la seguridad y la operación” (Kinnison & Siddiqui, 2013, pág. 2.1).

Entonces, el MSG-2 es un programa orientado al proceso que fusiona elementos de HT, OC y CM (Kinnison & Siddiqui, 2013); la Figura muestra el diagrama simplificado de ese proceso. Brevemente, si la falla de la unidad está relacionada con la seguridad (bloque 1) y hay una verificación de mantenimiento disponible para detectar una reducción en la resistencia a la falla

(bloque 4), entonces el elemento en cuestión se identifica como en condición. Si no hay tal cheque disponible, entonces el artículo se clasifica como tiempo difícil.

Figura 3. Diagrama de flujo de MSG-2 simplificado.



Fuente: (Kinnison & Siddiqui, 2013)

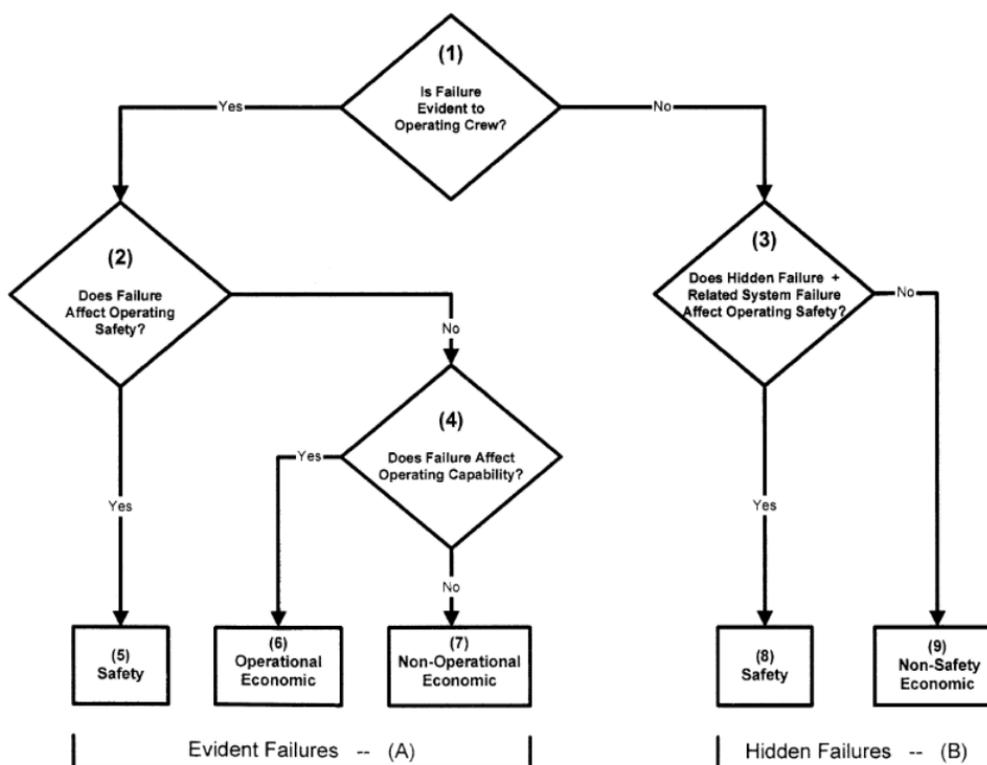
Luego para 1980 fue modificado el proceso MSG-2, el cual fue publicado en un documento por la Asociación de Transporte Aéreo de América, en el que se establece que el "MSG-3 no constituye una desviación fundamental de la versión anterior, sino que se basa en el marco existente de MSG-2 que había sido validado por 10 años de operación confiable de aeronaves utilizando los programas de mantenimiento basados en él." (Kinnison & Siddiqui, 2013, pág. 2.5)

El programa MSG-3 ajustó la lógica de decisión para proporcionar una progresión más directa y lineal a través de la lógica.

El proceso MSG-3 es un enfoque de arriba hacia abajo o un enfoque de consecuencia de falla, en otras palabras, ¿cómo afecta la falla a la operación?; no importa si un sistema,

subsistema o componente falla o se deteriora, lo que importa es cómo la falla afecta la operación de la aeronave. A la falla se le asigna una de dos categorías básicas: de seguridad y económica. La Figura 3 presenta el diagrama simplificado del primer paso, en el proceso lógico MSG-3. (Kinnison & Siddiqui, 2013, pág. 2.5)

Figura 3. MSG-3 - análisis de nivel I - categorías de falla.



Fuente: (Kinnison & Siddiqui, 2013)

### 2.4.1 Diferencia, ventajas y desventajas de los programas MSG-2 y MSG-3

A continuación, en la Tabla 1 se resumen las principales diferencias entre el MSG-2 y MSG-3, con sus ventajas y desventajas de mayor relevancia:

Tabla 1. Comparación entre los programas MSG-2 y MSG-3

MSG - 2	MSG - 3
<b>Analysis</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• System</li> <li>• Structures</li> </ul>	<b>Analysis</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• System</li> <li>• Structures</li> <li>• Zonal</li> <li>• Enhanced Zonal Analysis Procedure (EZAP)</li> </ul>
<b>Bottoms up Approach</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Airplane</li> <li>• System</li> <li>• Part Number</li> <li>• Component Serial No</li> </ul> 	<b>Top Down Approachh</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Airplane</li> <li>• System</li> <li>• Part Number</li> <li>• Component Serial No</li> </ul> 
<b>Process Oriented System Analysis</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hard Time (HT)</li> <li>• On-condition (OC)</li> <li>• Condition Monitoring (CM)</li> </ul>	<b>Task Oriented System Analysis</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lubrication/Servicing (Lub/SVC)</li> <li>• Operational/Visual Check (OPC/VCK)</li> <li>• Inspection/Functional Check (GVI/DVI/FNC)</li> <li>• Restoration (RST)</li> <li>• Discard (DIS)</li> </ul>
Analysis at the lowest manageable level	Analysis at the highest manageable level

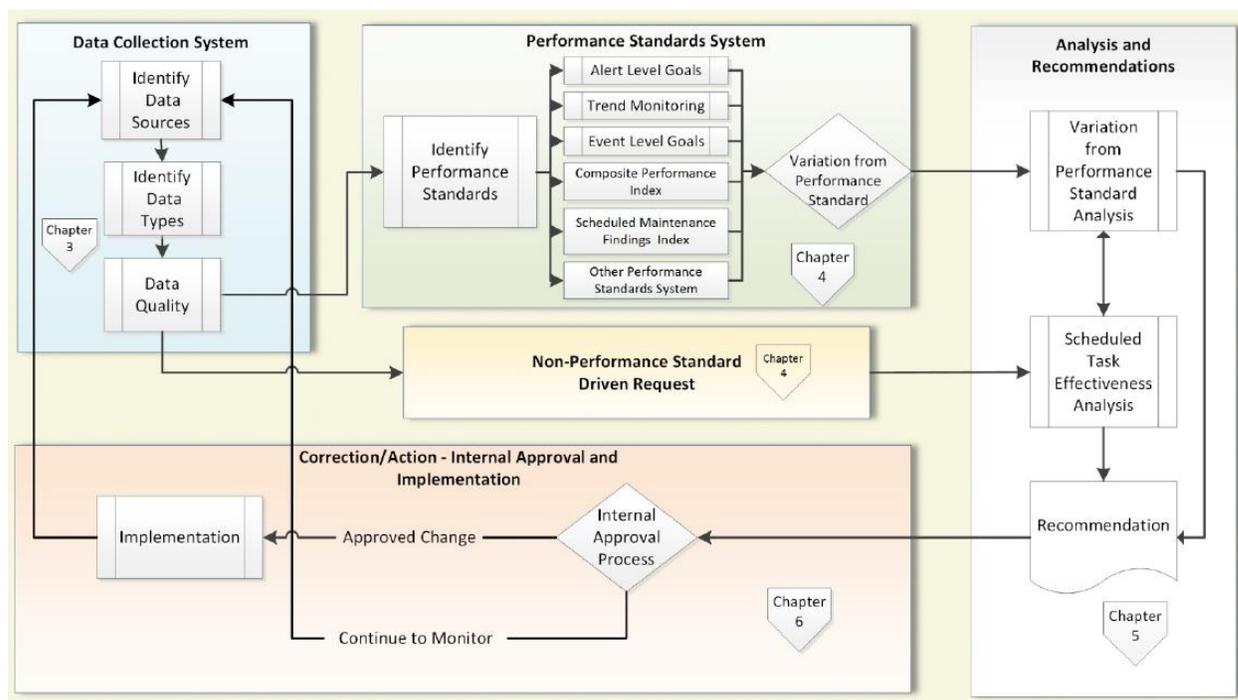
Fuente: (Boeing, 2014)

### 2.5 Programa de Confiabilidad

En 1978 la Federal Aviation Administration (FAA) emitió una circular de asesoramiento en donde compartía los métodos de confiabilidad para el control de mantenimiento de aeronaves y por el cual se rigieron varios operadores de aviación para elaborar sus programas de confiabilidad aprobados por la misma FAA; estos son basados en la filosofía MSG-2 mencionada anteriormente. Cuarenta años más tarde y después de valiosos aportes de diferentes entidades de aviación, se ha

consolido una nueva Advisory Circular (AC<sup>6</sup>) 120-17B – ver Figura 4- que enmarca nuevos conceptos de confiabilidad en la aviación moderna, como lo son la aeronavegabilidad continuada y el MSG-3.

Figura 4. Gestión y Administración Programa de Confiabilidad



Fuente: (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2018)

Si bien existen diferentes tipos de confiabilidad como la estadística y la histórica, en este proyecto se trabajará sobre la confiabilidad orientada a los eventos y la confiabilidad de despacho.

<sup>6</sup> AC, es el acrónimo de su término en inglés (Advisory Circular), lo que en español se traduce como avion Circular de Asesoramiento. Las Circulares de Asesoramiento son documentos informativos producidos por la FAA (Administración Federal de Aviación) para informar y guiar a las instituciones e individuos dentro de la industria de la aviación, así como al público en general.

### **3. Definición de parámetros requeridos para un sistema de identificación, seguimiento y control de un programa de confiabilidad técnica enfocado en fallas operacionales de una flota de aviones aplicable en aerolíneas comerciales colombianas**

Siddiqui (2013) clasifica la confiabilidad del despacho como una medida de la efectividad general de la operación de la aerolínea con respecto a la salida a tiempo la cual recibe una atención considerable de las autoridades reguladoras, así como de las aerolíneas y los pasajeros, pero en realidad, es solo una forma especial del enfoque de confiabilidad orientada a eventos, ya que ésta busca efectos como IFSD, ATB, RTO, etc., (ver Tabla 3) los cuales conllevan a consecuencias en la confiabilidad de despacho.

El indicador Severity Index o Índice de Severidad busca el impacto de las interrupciones o eventos operacionales (Demoras, Cancelaciones, Regresos de Vuelo, etc.), por ejemplo, si se presentan cinco demoras mayores, de 2 horas, y el valor o peso ponderado para este tipo de demoras es de 4 según Tabla 3, multiplicamos 5 por 4 obteniendo 20, para luego estandarizarlo a 1000 despegues utilizando la Ecuación 2, así:

$$SI = \frac{[\sum(Event \times weight)] \times 1000}{Revenue \ Take - Offs}$$

Ecuación 2. Severity Index

Fuente: (Government of Canada, 2019)

#### **3.1 Proceso del sistema de identificación, seguimiento y control**

La confiabilidad técnica establece los códigos 41 (ver Anexo A), con el fin de identificar fallas que afecten directamente el indicador de esta confiabilidad.

El indicador más usado por los operadores aéreos es el tomado desde las demoras técnicas mayores a 15 minutos, este último, con el argumento de que una demora menor a 15 no afecta significativamente la operación, lo que denominan de impacto operacional menor. Sin embargo,

en este proyecto se considera el indicador de confiabilidad técnica, desde el primer minuto de la demora, debido a que en Colombia el 65% de los vuelos son operado en rutas domésticas (Aeronáutica Civil, 2019), en las cuales el tiempo oscila entre los 30 minutos y una hora de vuelo, por lo que se consideran importantes las demoras que se generan de 0 a 15 minutos. Por ejemplo, una ruta operada desde una base principal como Bogotá a un destino común y lejano como Barranquilla, tiene una duración de vuelo de 59 minutos y otras rutas más cortas como Bogotá - Medellín o Bogotá - Bucaramanga, tienen un promedio de duración de vuelo de 30 minutos, por lo tanto, dar relevancia a estas demoras menores a 15 minutos es pertinente, ya que es prácticamente improbable recuperar estos minutos en vuelo, como ocurre en trayectos largos como los internacionales. Es así como cobran relevancia debido a que afectan indicadores como el OTP<sup>7</sup> (On Time Performance) que se mide, no desde las demoras a la salida del vuelo, sino como la demora a la llegada del vuelo, siendo importante este indicador para las aerolíneas, ya que con esto se califica la puntualidad.

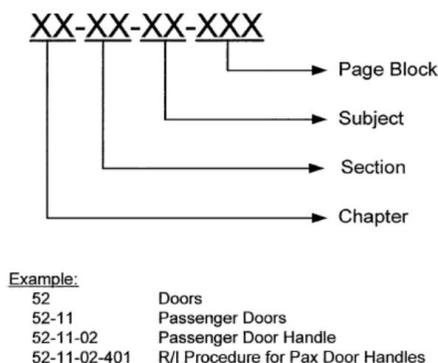
Una vez identificado por ATA (ver Figura 5) o sistemas y el mayor índice de severidad del mes, se busca agrupar por el peso ponderado los modos de falla en la escala de mayor a menor, identificando los tres de mayor relevancia (Top 3). Para esto es necesario tomar la demora o cancelación primaria y todas sus consecuencias, es decir, demoras o cancelaciones posteriores correlacionadas con la demora original o primaria del mes que se está evaluando (en esta parte se usan todos los códigos del 41 al 48)<sup>8</sup>. Con esta técnica se busca encontrar los modos de falla más frecuentes en la flota de aviones y de mayor afectación en la operación. Esto teniendo en cuenta que se está trabajando en los sistemas que han generado las interrupciones operacionales que afectan directamente el indicado de confiabilidad técnica de la flota.

---

<sup>7</sup> El OTP (On Time Performance) tiene un papel fundamental en la gestión de operaciones de las aerolíneas. Los retrasos afectan la productividad y cuestan a las aerolíneas miles de dólares cada año. Muchas aerolíneas han integrado OTP como KPI y lo utilizan para medir y evaluar procesos e identificar mejoras en sus operaciones.

<sup>8</sup> Los códigos de demora IATA comprendidos desde el 40 hasta el 48, son códigos relacionados con el avion y el mantenimiento de este. (ver Anexo A)

Figura 5. Formato ATA para manuales de mantenimiento



Fuente: (Boeing, 2014)

Para los efectos del presente trabajo se va a trabajar únicamente el Chapter o capítulo y la sección del formato ATA, debido a que solo se identifica el sistema general.

Finalmente, utilizando el método del Roll Average<sup>9</sup> de 6, 3 y un mes, se agrupan los modos de falla para evaluar la tendencia y su incidencia histórica. Con este método se asegura que la toma de decisiones tenga repercusiones directas sobre el indicador de la confiabilidad técnica de la flota, salud de los sistemas del avión y los eventos de mayor afectación o impacto operacional.

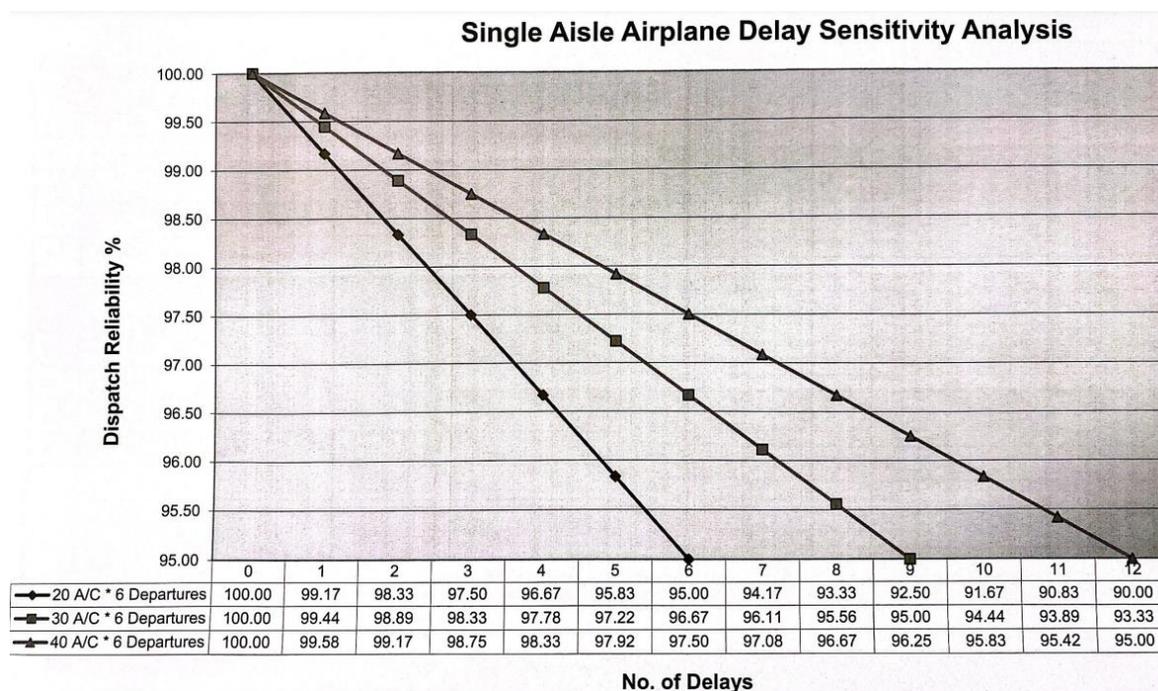
### 3.2 Cálculo de costos de confiabilidad

Una forma de poder calcular los costos asociados a la confiabilidad se basa en poder calcular un pip o punto porcentual de la confiabilidad de despacho en una flota de aviones. Es decir que si para calcular la confiabilidad de una aeronave, se toma el número de demoras y cancelaciones técnicas que afectaron la confiabilidad de la aeronave y la relación de vuelos Revenue de la misma, y esta da un valor de confiabilidad en porcentaje hasta 100. Calcular un pip de confiabilidad sería cuestión de cuantificar el costo de las demoras y/o cancelaciones que equivaldrían a ese pip.

<sup>9</sup> Roll Average es una métrica que calcula tendencias en períodos cortos de tiempo utilizando un conjunto de datos. Específicamente, ayuda a calcular tendencias cuando, de lo contrario, podrían ser difíciles de detectar.

En la Figura 6 se observa la relación entre la confiabilidad del despacho y la variación de las demoras respecto a flotas de aviones de tamaños específicos (20, 30 y 40 A/C<sup>10</sup>).

Figura 6. Analisis confiabilidad de despacho por variación de demoras



Fuente: (Boeing, 2014)

El costo de las demoras, cancelaciones (eventos operacionales), de una aerolínea se calcula a partir de diversos factores y estos dependen del tipo de evento o interrupción operacional (Demora, Cancelación, ATB, DIV etc.) es decir que, para una demora se pueden tomar factores asociados a costos como; servicios a clientes por alimentación. Para la tripulación y el personal en tierra, se deben pagar horas extras, acomodaciones, personal adicional etc. También, costos de operación como combustible de APU<sup>11</sup>, re-catering<sup>12</sup> por deterioro. Mientras que, por una cancelación pueden existir otros factores adicionales como acomodaciones de hotel a pasajeros afectados y

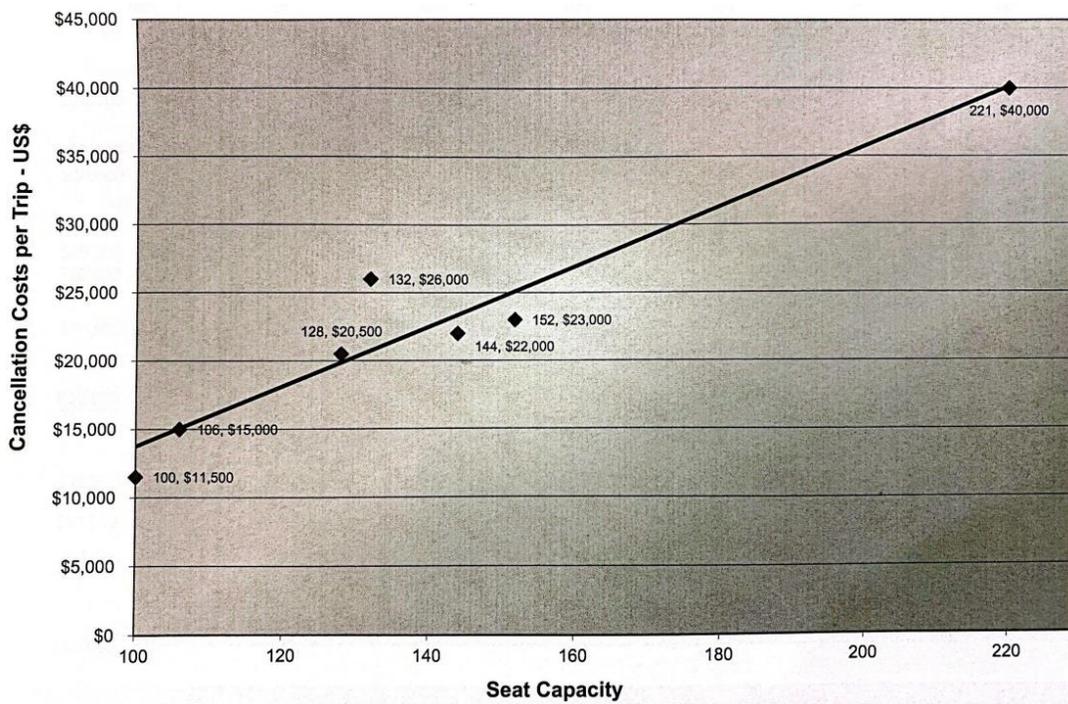
<sup>10</sup> A/C: acrónimo designado para Aircraft o aeronave en español

<sup>11</sup> La APU es la unidad auxiliar de poder o Auxiliary Power Unit por sus siglas en inglés. La APU es un motor de turbina de gas montado en el cono de cola de la aeronave para proporcionar energía eléctrica y mecánica autónoma cuando el avion se encuentra en tierra o en vuelo por alguna emergencia.

<sup>12</sup> Servicio de alimentación a bordo del avion.

tripulaciones, compensación a pasajeros y reorganización de vuelos entre otros. Es decir que entre una demora y una cancelación el impacto en costos de la cancelación tiende a ser mayor.

Figura 7. Costos de cancelación



Fuente: (Boeing, 2014)

En la Figura 7 se observa la variación de los costos de cancelación de vuelos en una flota de aviones estándar, en la que se puede determinar que el costo aumenta en relación con la capacidad del avión. Es decir que factores como la compensación de pasajeros y acomodaciones de hotel, incrementan el costo de la cancelación dependiendo de la cantidad de sillas u ocupación de avión.

#### **4. Desarrollo un sistema de identificación, seguimiento y control de un programa de confiabilidad técnica enfocado en fallas operacionales de una flota de aviones aplicable en aerolíneas comerciales colombianas**

La finalidad de este objetivo se fundamenta en mostrar de manera sistémica los eventos de Modo de Falla que se generan en un periodo determinado de tiempo sobre una flota de aviones específica y la incidencia que estos tienen sobre las medidas de desempeño propias de la Confiabilidad, comenzando a partir de su identificación, clasificación por Código de la demora, ATA del sistema y Weight<sup>13</sup> del evento, los cuales posteriormente se desagregan siguiendo una serie de reglas específicas para encontrar tendencias puntuales que permitan orientar el seguimiento y control de los mismos, y que de esta manera sea una herramienta útil para la toma de decisiones sobre el programa de confiabilidad de una aerolínea.

##### **FASE PRELIMINAR (ETAPA 0 – Identificación de los Eventos de Falla)**

Para poder identificar los eventos de falla que tienen incidencia directa en la confiabilidad se realizó el análisis de una base de datos que consta de una flota de aviones con 887 demoras totales en un periodo de un año, para esto como etapa preliminar a la estructuración del sistema se desagregan únicamente los eventos que correspondieran a demoras (DY) y cancelaciones (CN), y además aquellas que se clasifican con el código relacionado a confiabilidad (Código 41, ver Anexo A), finalmente el resultante fueron 265 eventos de falla como se ilustra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 2. Eventos de falla totales

<b>Código</b>	<b>Eventos</b>
24	1
34	4
41	265
42	30
43	301
44	73
45	19
48	33

<sup>13</sup> Weight: Peso ponderado del evento

51	87
52	53
62	1
65	10
71	4
76	1
77	4
87	1
<b>Total Eventos</b>	887

Fuente: Elaboración propia, 2022

Posteriormente una vez han sido clasificados los eventos por código y para la estructuración del sistema se parte por establecer los pesos correspondientes al tipo de evento presentado, con base en lo establecido en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 3. Pesos equivalentes al tipo de falla presentada

<b>Evento</b>	<b>Peso Evento</b>
DVI - Diversion	10
ATB - Air Turn Back	10
IFSD - In Flight Shut Down	10
RTO - Reject Take Off	10
Cancelación	5
Demora > 120 min	4
Demora 91-120 min	3
Demora 46-90 min	2
Demora 16-45 min	1
Demora <=15 min	0.5
GTB - Ground Turn Back	2.25

Fuente: Adaptada de (AIRBUS, 2018)

Teniendo en cuenta que cualquiera de los eventos referenciados en la Tabla 3 pueden presentarse en cualquier momento durante el transcurso de la operación, es importante resaltar que existe una franja horaria crítica sobre la cual un evento de falla tiene un mayor impacto sobre la misma.

La franja horaria denominada Head Start comprende el inicio de la operación, el cual está definido entre las 05:00 hasta las 08:00, por ende cualquier evento presentado en este rango tiene

una incidencia notable hasta el final de la operación, por lo cual es insuficiente el puntaje establecido en la Tabla 3.

Si hacemos mención a una demora superior a 120 minutos presentada inmediatamente después de iniciada la operación (05:00), estamos abarcando casi la totalidad de la franja horaria del Head Start, con lo cual el Peso de 4 (Según Tabla 3) para la demora no refleja el impacto real que esta tiene sobre la operación, ya que se asemeja más al peso de una cancelación.

Ahora bien, ya que únicamente se debe contemplar una penalización del Peso de los eventos mencionados en la Tabla 3, para la franja del Head Start se establece una razón entre el valor de una cancelación y el valor de la demora de mayor tiempo (Demora > 120 min). La relación entre la cancelación (peso: 5) y la demora (peso: 4) tiene como resultante un cociente de 1.25, el cual es fijado como parámetro multiplicatorio para todos los eventos referenciados en la Tabla 3 y que se presentan en el rango horario entre 05:00 a 08:00.

Con la información obtenida hasta este punto, se procede a la clasificación de las fallas identificadas por franja hora horaria, las cuales serán multiplicadas por el factor establecido en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 4. Factor Multiplicatorio por franja horaria

Franja Horaria	Factor Multiplicatorio
5:00 - 8:00	1.25*Peso
8:01 - Final de Operación	1*Peso

Fuente: Elaboración propia, 2022

Finalmente, el último paso de esta etapa corresponde a establecer los ciclos ejecutados por la flota de aviones (Revenue Take-Off) <sup>14</sup> en un periodo determinado de tiempo que debería corresponder a un mes calendario para efectos de control y trazabilidad como muestra la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

---

<sup>14</sup> Revenue Take-off: Son los vuelos (despegues o ciclos) ejecutados por una flota de aviones que generan ganancia para la aerolínea.

Tabla 5. Clasificación de los eventos de falla por mes

Evento	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
Cancelación	2	5	0	0	0	3	3	1	0	3	1	1
Demora > 120 min	2	2	0	0	1	2	0	3	1	1	1	1
Demora 91 - 120 min	2	2	3	3	1	2	0	0	1	2	2	0
Demora 46 - 90 min	0	5	2	3	4	2	0	3	4	0	4	5
Demora 16 - 45 min	6	5	5	4	4	5	5	3	8	8	4	5
Demora <= 15 min	8	8	4	8	8	15	11	11	13	8	14	12
Revenue Take-Off	1889	1802	1774	1859	1364	1938	1588	1817	1708	1871	1868	1890

Fuente: Elaboración propia, 2022

### FASE AGREGADA (Etapa 1 – Estimación de las medidas de desempeño por mes)

Inicialmente para determinar el valor de las medidas de desempeño mensuales establecidas por el sistema de confiabilidad se deben seguir los siguientes parámetros:

1. Estimación de la Confiabilidad de la flota de aviones durante un mes (Technical Dispatch Reliability) por medio de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

$$Reliability (DR) = 100 - \left( \left( \frac{DY + CN}{Revenue\ Take - Offs} \right) * 100 \right)$$

Ecuación 2. Dispatch Reliability

Fuente: (IN-SERVICE RELIABILITY DATA REPORTING, 2019)

Para esto se deben fijar dos casos:

**Caso 1:** (Calculo de la Confiabilidad (DY > 15min))

Donde las variables corresponden a:

- DY: Número de demoras generadas en un mes mayores a 15 minutos.

- CN: Número de Cancelaciones generadas en un mes.
- Revenue Take – Offs: Número de ciclos ejecutados por la flota de aviones durante un mes.

Finalmente, el cálculo de la Confiabilidad (DY > 15 min) se determina con base en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, que para entendimiento del documento se denomina “F”.

**Caso 2:** (Calculo de la Confiabilidad (DY > 0 min))

Donde las variables corresponden a:

- DY: Número de demoras generadas en un mes mayores a 0 minutos.
- CN: Número de Cancelaciones generadas en un mes.
- Revenue Take - Off: Número de ciclos ejecutados por la flota de aviones durante un mes.

Finalmente, el cálculo de la Confiabilidad (DY > 0 min) se determina con base en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, que para entendimiento del documento se denomina “Z”

2. Estimación del Delta de cada mes, con base en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

$$Delta (\%) = DR(Z) - DR(F)$$

Ecuación 3. Porcentaje Delta

Fuente: Elaboración propia, 2022

Donde:

- DR(F): Confiabilidad (a 15 minutos) de un mes para una flota de aviones
- DR(Z): Confiabilidad (a 0 minutos) de un mes para una flota de aviones

- Delta (%): Corresponde a la pérdida de Confiabilidad no percibida por demoras generadas menores a 15 minutos (Su valor siempre es menor que 0).

Una vez se han definido los numerales 1 y 2 se deben consolidar la información como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

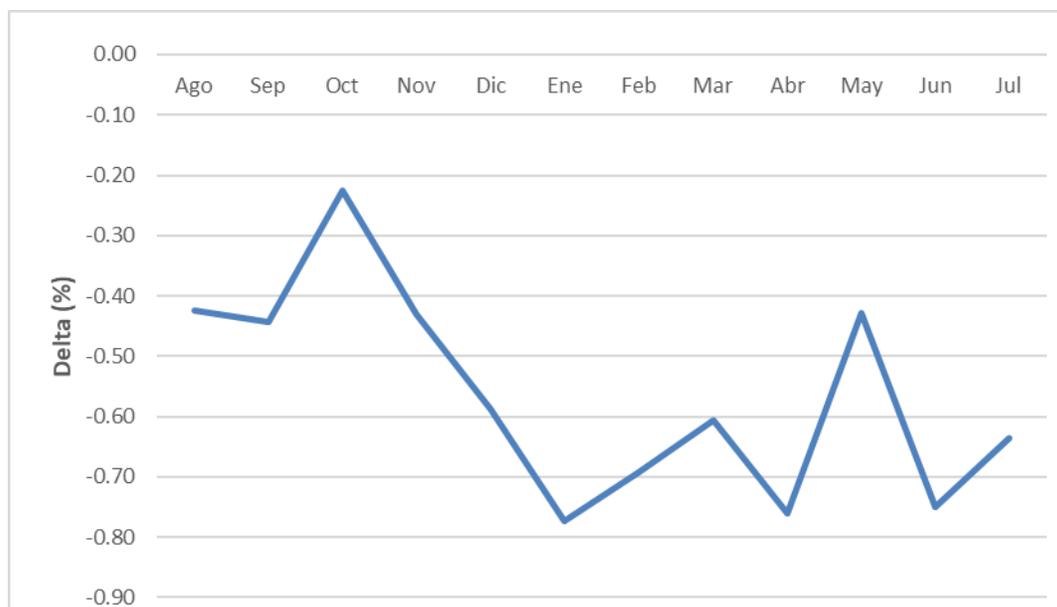
Tabla 6. Medidas de desempeño referentes a Confiabilidad

Mes	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
Cancelación (CN)	2	5	0	0	0	3	3	1	0	3	1	1
Demora > 15 min (DY)	10	14	10	10	10	11	5	9	14	11	11	11
Demora <= 15 min (DY)	8	8	4	8	8	15	11	11	13	8	14	12
Reliability % (Z)	98.94	98.50	99.21	99.03	98.68	98.50	98.80	98.84	98.42	98.82	98.61	98.73
Reliability % (F)	99.36	98.95	99.44	99.46	99.27	99.28	99.50	99.45	99.18	99.25	99.36	99.37
Delta %	-0.42	-0.44	-0.23	-0.43	-0.59	-0.77	-0.69	-0.61	-0.76	-0.43	-0.75	-0.63
Revenue Take-Off	1889	1802	1774	1859	1364	1938	1588	1817	1708	1871	1868	1890

Fuente: Elaboración propia, 2022

Posteriormente se grafica el Delta para determinar si la pérdida de confiabilidad no percibida sigue una tendencia durante el transcurso de los meses que se analizan, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 8. Pérdida de Confiabilidad no percibida por mes



Fuente: Elaboración propia, 2022

Como se ilustra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se puede establecer que existe una tendencia marcada de pérdida de Confiabilidad no percibida entre los meses de Octubre a Enero, de esta manera también es necesario graficar la comparativa de las Confiabilidades (F y Z) con la finalidad -de identificar si existe una brecha que no se ve reflejada a partir del cálculo de la Confiabilidad (F).

Además, se calcula la tasa de variación de la Confiabilidad para verificar si existen discrepancias entre la Confiabilidad F y Z, la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** define la manera en que se debe estimar la tasa:

$$t_i = DR_i - DR_{i-1}$$

Ecuación 4. Variación de la confiabilidad

Fuente: Elaboración propia, 2022

Donde:

(i): Mes que se analizando.

(i-1): Mes inmediatamente anterior al que se está analizando.

DR: Confiabilidad de un mes para una flota de aviones (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Finalmente, el consolidado de las tasas de variación se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 7. Tasa de variación de Confiabilidad

	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
<b>ti DR(Z)</b>	-0.44	0.71	-0.18	-0.35	-0.18	0.30	0.04	-0.43	0.40	-0.22	0.12
<b>tiDR (F)</b>	-0.42	0.49	0.03	-0.20	0.01	0.22	-0.05	-0.27	0.07	0.11	0.01
<b>Indicativo</b>	P	P	D	P	D	P	D	P	P	D	P

Fuente: Elaboración propia, 2022

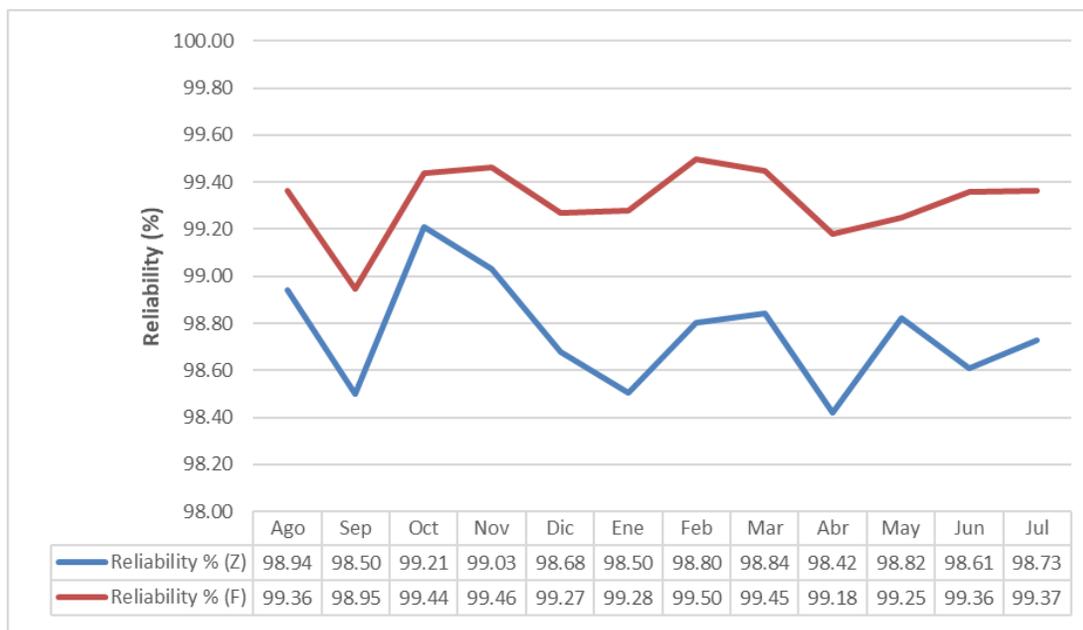
Según lo expresado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** existen dos tipos de indicativos P y D, el indicativo P hace referencia a que la tasa de variación de las Confiabilidades (F y Z) para el mismo mes en comparación tienen un patrón de comportamiento idéntico (crecen o decrecen en cada una de estas), o dicho de otra manera ambas tienen el mismo signo, finalmente los meses de Septiembre, Octubre, Diciembre, Febrero, Abril, Mayo y Julio muestran este comportamiento para el caso de estudio analizado.

Por otro lado, el indicativo D hace mención a lo contrario, pues la tasa de variación mensual de las Confiabilidades (F y Z) tienen un comportamiento diferente, es decir para el mismo mes en comparación una muestra un patrón distinto de la otra, ya que mientras una de estas crece en un mes la otra decrece en el mismo periodo analizado, por ende ambas no tienen el mismo signo como se evidencia en la Tabla 7, los meses de Noviembre, Enero, Marzo, Junio presentan estas discrepancias.

Cabe resaltar que según los datos evidenciados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** no existen más de 2 meses consecutivos con patrones similares entre las Confiabilidades F y Z, por lo cual se demuestra de esta forma el impacto que tienen las demoras menores a 15 minutos generadas en un mes en cuestión y que no son tenidas en cuenta para determinar la Confiabilidad del mes de acuerdo a lo reportado al fabricante para una flota de aviones específica, además se identifica que existe una brecha no percibida al no incluir estas demoras en el cálculo, según la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Como se puede visualizar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el comportamiento que tienen las Confiabilidades demuestra que la “F” siempre se encuentra por encima de la “Z” y que las variaciones entre meses para cada una no siguen el mismo patrón comparativo.

Figura 9. Comportamiento de la Confiabilidad (F) vs Confiabilidad (Z)



Fuente: Elaboración propia, 2022

3. Calcular el Severity Index del mes para la flota de aviones de manera agregada mediante la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

$$SI = \frac{[\sum(Events * Weight)] * 1000}{Revenue Take - Offs}$$

Ecuación 5. Severity Index

Fuente: (Government of Canada, 2019)

Es relevante aclarar que para el cálculo del Severity Index se deben incluir todas las demoras mayores a 0 minutos generadas en el mes en cuestión, así como también las cancelaciones con sus respectivos pesos establecidos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Los resultados de este indicador se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 8. Severity Index por mes

Mes	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
Eventos	20	27	14	18	18	29	19	21	27	22	26	24
Peso (Prom.)	1.71	2.69	1.67	1.28	1.42	1.58	1.34	1.52	1.14	1.84	1.52	1.28
Peso (Mes)	34.25	72.56	23.37	23	25.62	45.87	25.5	32	30.875	40.43	39.56	30.75
Revenue Take-Off	1889	1802	1774	1859	1364	1938	1588	1817	1708	1871	1868	1890
Severity Index	18.13	40.27	13.18	12.37	18.79	23.67	16.06	17.61	18.08	21.61	21.18	16.27

Fuente: Elaboración propia, 2022

Los valores generados en la Tabla 8 son de gran importancia para la fase siguiente.

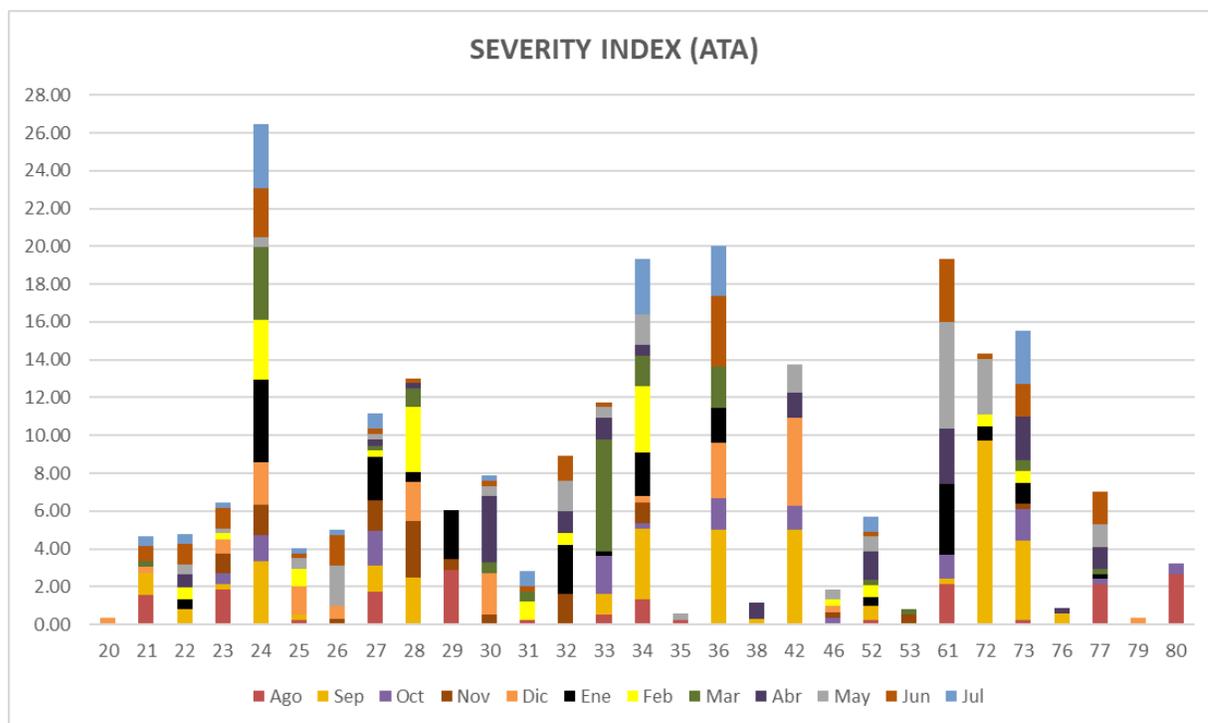
#### **FASE DESAGREGADA (Etapa 2 – Desagregación del Severity Index por ATA)**

Para esta etapa se debe desagregar el Severity Index con las siguientes indicaciones:

4. Determinar el peso de los eventos de falla, clasificados por número de ATA como indican la Tabla 2 y 3.
- 4.1. Calcular el Severity Index por número de ATA siguiendo la ecuación (5)

Una vez se ha realizado la desagregación del Severity Index por ATA, se puede visualizar como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 10. Severity Index consolidado por ATA



Fuente: Elaboración propia, 2022

Aunque la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** nos muestra de manera global la totalización del Severity Index de todos los meses analizados, es de suma importancia establecer un límite de filtrado con la finalidad de visualizar cuales son las ATA que mayor impacto generan en el SI de cada mes en cuestión.

**4.2.** Establecer la contribución porcentual que cada ATA genera en el Severity Index con base en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

$$\%CA = \frac{Severity\ Index(ATA)}{Severity\ Index\ (mes)} * 100$$

Ecuación 6. %CA al Severity Index

Fuente: Elaboración propia, 2022

Los resultados de este apartado se especifican en el ANEXO C.

**FASE DESAGREGADA (Etapa 3 – Clasificación de las ATA con mayor impacto al Severity Index de cada mes)**

Para efectos de toma de decisiones no es posible abarcar todas las ATA que comprenden el Severity Index de cualquier mes en análisis, por ende se define un mecanismo que permite delimitar aquellas que se deben considerar para las etapas siguientes:

- 4.3.** Inicialmente clasificar en un Top 3 en orden descendente aquellas ATA que mayor contribución tienen en el Severity Index del mes analizado, siguiendo lo establecido en el numeral 4.2.

Tabla 9. Clasificación inicial de ATA de mayor impacto al Severity Index

Mes	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
ATA N°1	29	72	33	28	42	24	34	33	30	61	36	24
ATA N°2	80	42	27		36	61	28	24	61	72	61	34
ATA N°3		36					24	36	73	26	24	73

Fuente: Elaboración propia, 2022

En la clasificación inicial que se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se clasifican únicamente las ATA que se sitúan dentro del Top 3 del mes y que no empatan en cuanto a contribución al Severity Index con ninguna otra.

Ahora bien, los vacíos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** indican que existe un empate en cuanto %CA entre 2 o más ATA, debiendo romper el empate entre estas para su posterior análisis (máximo son 3 por mes), por ende si se presenta este caso, se deben seguir una serie de condicionales que se explican a continuación.

Tabla 10. ATA que presentan empate en %CA del mes

Mes	Ago	Oct	Nov	Dic	Ene
ATA	61	36	24	24	29
ATA	77	73	27	30	32
ATA			32		

Fuente: Elaboracion propia, 2022

Tomando como referencia lo especificado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, las reglas desempate se deben cumplir en orden jerárquico, ya que ante un empate entre dos o más ATA para definir el Top 3 que será analizado posteriormente es de obligatorio

cumplimiento situarse primeramente en el numeral A, y solo se debe recurrir a los siguientes en dado caso en que no se rompa el empate en cuanto a %CA se refiere.

De esta manera, si el %CA entre dos o más ATA en un mes analizado es exactamente el mismo:

- A.** Se visualiza el %CA del mes inmediatamente anterior de las ATA que presentan el empate, como se explica a continuación:

Tabla 11. %CA para Noviembre

ATA	Oct	Nov
24	10.7%	13.0%
27	13.9%	13.0%
32	0.0%	13.0%

Fuente: Elaboración propia, 2022

Como se evidencia en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** existen 3 ATA con el mismo %CA para el mes de Noviembre, con lo cual el factor de desempate lo determinan las cifras de Octubre que es diferente para todas, y que permite identificar que las ATA 27 y 24 son las que completan el Top 3 del mes.

- B.** Si el empate aún persiste, se procede a visualizar el %CA de 2 meses antes al que se está analizando, de la siguiente forma.

Tabla 12. %CA para Enero

ATA	Nov	Dic	Ene
29	4.3%	0.0%	10.9%
32	13.0%	0.0%	10.9%

Fuente: Elaboración propia, 2022

Según los datos de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** existen 2 ATA con el mismo %CA para el mes de Enero, pero las cifras de referencia para el mes de Diciembre son iguales para ambas y el empate aún no se rompe (como especifica el numeral A), por lo cual el factor de desempate lo definen los datos de Noviembre que es diferente para las dos, y que permite identificar que el ATA 32 completa el Top 3 del mes.

- C. Si el empate aún permanece, se procede a visualizar el %CA de 3 meses antes al que se está analizando, siguiendo el mismo parámetro especificado en el numeral B.
- D. Una vez se haya pasado por el numeral C y aún exista un empate entre 2 o más ATA en cuanto a %CA se refiere, depende del analista definir cuáles serán las que ingresan al Top 3 para su posterior análisis.
- E. Como caso especial, en dado caso que no exista un histórico de %CA y se parta de un análisis en el que existe un empate entre ATA, depende del analista definir las que ingresan al Top 3, como se muestra a continuación.

Tabla 13. %CA para Agosto

ATA	Ago
61	11.7%
77	11.7%

Fuente: Elaboración propia, 2022

Según la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** existe un empate entre 2 ATA para el mes de Agosto, y ya que no se cuenta con un histórico previo a este mes, se fija por criterio propio seleccionar el ATA 61 para completar el Top 3 del mes correspondiente.

Para un mayor entendimiento de este apartado diríjase al Anexo C.

#### 4.4. Definir la clasificación final del Top 3 de ATA que mayor contribución tienen en el Severity Index del mes analizado.

Con base en lo establecido en el Top 3 del numeral 4.3, la clasificación final de las ATA a ser analizadas en etapas posteriores son las siguientes.

Tabla 14. Clasificación final de ATA de mayor impacto al Severity Index

Mes	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
<b>ATA N°1</b>	29	72	33	28	42	24	34	33	30	61	36	24
<b>ATA N°2</b>	80	42	27	27	36	61	28	24	61	72	61	34
<b>ATA N°3</b>	61	36	36	24	24	32	24	36	73	26	24	73

Fuente: Elaboración propia, 2022

Teniendo en cuenta lo expresado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se definen los porcentajes de cada ATA por mes según corresponda.

Tabla 15. %CA al Severity Index de cada mes

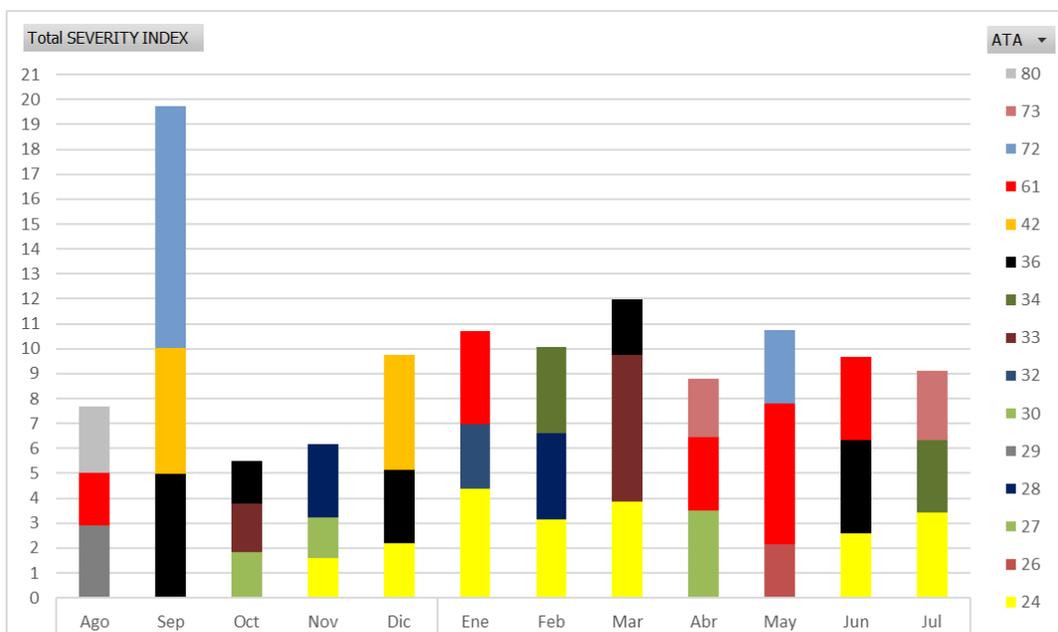
Mes	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
<b>%CA (1)</b>	16.1%	24.1%	15.0%	23.9%	24.6%	18.5%	21.6%	33.6%	19.4%	26.3%	17.7%	21.1%
<b>%CA (2)</b>	14.6%	12.5%	13.9%	13.0%	15.6%	15.8%	21.6%	21.9%	16.2%	13.6%	15.8%	17.9%
<b>%CA (3)</b>	11.7%	12.4%	12.8%	13.0%	11.7%	10.9%	19.6%	12.5%	13.0%	9.9%	12.2%	17.1%
<b>TOTAL</b>	42.3%	49.0%	41.7%	50.0%	52.0%	45.2%	62.7%	68.0%	48.6%	49.8%	45.7%	56.1%

Fuente: Elaboración propia, 2022

Los porcentajes que se mencionan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** funcionan como referencia para determinar en cuánto llega a impactar el Top 3 al Severity Index, que según el caso de estudio para todos los meses es superior al 40%, por lo que atendiendo únicamente a estas ATA, se puede llegar a establecer un control más limitado y efectivo a los Modos de falla presentados en cada mes.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se ilustra el Severity Index del Top 3 de ATA para cada mes, lo cual permite ver de una manera más sencilla el comportamiento de este conjunto en cada mes, además permite identificar algunas tendencias generadas por algunas ATA en específico.

Figura 11. Severity Index del Top 3 de ATA por mes



Fuente: Elaboración propia, 2022

#### FASE DEL ROLL AVERAGE (Etapa 4 – Agrupación de los Modos de falla por Peso)

A partir de esta fase se pretende determinar la tendencia de los datos por medio de los Modos de Falla, y su estructuración es la siguiente:

5. Consolidar todos los eventos de falla situados en el rango de códigos 41 a 48 (ver Anexo A. Códigos de Demoras) como indica la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y clasificarlos por peso ponderado como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

- 5.1. Indicar por peso ponderado los Modos de falla que se presentan en el mes analizado de la siguiente manera:

Tabla 16. Peso ponderado de los Modos de falla presentados en el mes de Julio

ATA 73 (Peso por Avión)					
MODO DE FALLA	HI-4	HI-5	HI-6	HI-8	Total Peso

ENGINE FAULT		1			1
EEC FAULT				2.25	2.25
FUEL NOZZLES			1		1
FUEL TEMP HI	6				6

Fuente: Elaboración propia, 2022

Como se evidencia en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** siendo el mes de Julio el que se está analizando, se consolida el peso ponderado por cada Modo de falla de los eventos presentados únicamente en este mes, ya que es a partir de estos datos que se pueden establecer las tendencias correspondientes.

6. Tomar en consideración máximo 3 de los Modos de falla que mayor peso representan en el mes analizado.
- 6.1. Si existen más de 3 Modos de falla en el mes analizado y hay un empate en cuanto a peso se refiere, se deben totalizar el número de eventos que presenta cada uno de estos (durante los últimos 6 meses) y se sugiere considerar aquel que tenga un mayor valor durante este periodo de tiempo, tal y como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**
7. Totalizar el número de eventos generados por cada Modo de falla (siguiendo las mismas consideraciones del numeral 5), presentados durante los últimos 6 meses y que serán de suma importancia para determinar el Roll Average.

Tabla 17. Histórico de eventos por Modo de falla

MODO DE FALLA	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Total Eventos
FUEL TEMP HI	4	1	3	4	0	2	14
EEC FAULT	0	1	0	0	0	1	2
FUEL NOZZLES	1	0	1	0	0	1	3
ENGINE FAULT	0	0	1	0	0	1	2

Fuente: Elaboración propia, 2022

Como se puede ver en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, los Modos de falla presentados en el mes de Julio se clasifican por número de eventos y se consideran también las cifras que presenta cada uno de estos en un histórico de 6 meses, y que son relevantes para

establecer tendencias, además se visualiza un dato resaltado, que corresponde al empate generado por peso en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y que no se tendrá en cuenta para la determinación del Roll Average.

### **FASE DEL ROLL AVERAGE (Etapa 5 – Generación del ROLL AVERAGE por Modo de falla)**

8. Determinar el Roll Average (6M-3M-1M) para cada Modo de falla con el fin de visualizar si existen tendencias, el cálculo de este indicador sigue la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

$$OIR = \frac{\sum \text{Eventos de Modo de falla} * 100}{\sum \text{Revenue Take} - \text{Offs}}$$

Ecuación 7. Roll Average por Modo de falla

Fuente: (AIRBUS, 2019)

Para el cálculo del indicador OIR (6M-3M-1M), se deben seguir las indicaciones.

#### **Caso 1 (OIR (6 meses))**

Para este caso la sumatoria de los eventos de cada Modo de falla corresponden a los últimos 6 meses respecto del mes que se está analizando, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** el periodo indicado para este cálculo corresponde a los meses desde Febrero hasta Julio, además los Revenue Take – Offs también siguen este mismo parámetro y la suma se establece con base en lo indicado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

#### **Caso 2 (OIR (3 meses))**

Para este caso la sumatoria de los eventos de cada Modo de falla corresponden a los últimos 3 meses respecto del mes que se está analizando, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** el periodo indicado para este cálculo corresponde a los meses desde Mayo hasta Julio, además los Revenue Take – Offs también siguen este mismo parámetro y la

suma se establece con base en lo indicado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

### Caso 3 (OIR (1 mes))

Para este caso solamente se deben considerar los eventos de cada Modo de falla presentados en el mes que se está analizando, como se muestra en la Tabla el periodo de referencia para este cálculo corresponde al mes de Julio, además los Revenue Take - Offs también siguen este mismo parámetro y se establecen con base en lo indicado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Finalmente, siguiendo las indicaciones de cada uno de los casos que se expresan en este numeral los resultados para todos los Modos de falla presentados en el mes de Julio y por tipo de ATA se explican en la siguiente Tabla.

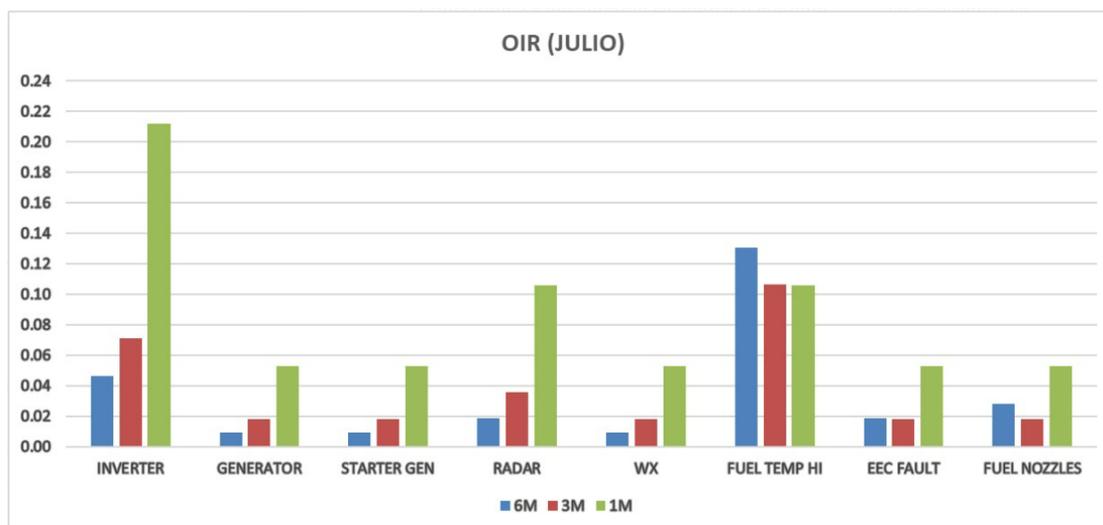
Tabla 18. Valor del OIR por Modo de Falla para cada ATA del mes de Julio

OIR	MODO DE FALLA - ATA 24			MODO DE FALLA - ATA 34		MODO DE FALLA - ATA 73		
	INVERTER	GENERATOR	STARTER GEN	RADAR	WX	FUEL TEMP HI	EEC FAULT	FUEL NOZZLES
6M	0.0465	0.0093	0.0093	0.0186	0.0093	0.1303	0.0186	0.0279
3M	0.0711	0.0178	0.0178	0.0355	0.0178	0.1066	0.0178	0.0178
1M	0.2116	0.0529	0.0529	0.1058	0.0529	0.1058	0.0529	0.0529

Fuente: Elaboración propia, 2022

De manera gráfica y para un mejor entendimiento del OIR (6M-3M-1M), se puede visualizar la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 12. OIR por Modo de falla para el mes de Julio



Fuente: Elaboración propia, 2022

Una vez se ha determinado el Roll Average (6M-3M-1M) para cada Modo de falla presentada en el mes que se está analizando, se procede a interpretar los resultados de las tendencias generadas para cada uno de estos.

Es muy importante que exista un histórico de por lo menos 6 meses para cada uno de los Modos de falla en cuestión, ya que esto permite que la interpretación de los datos generados por las tendencias (6M-3M-1M) sea concluyente, como se explica en el siguiente numeral.

9. Definir el tipo de tendencia que presenta cada Modo de falla con base en el Roll Average (6M-3M-1M).

Tal y como se menciona en el numeral 8 es de suma importancia contar con un histórico de mínimo 6 meses para el número de eventos del Modo de falla que se está analizando (incluso si la cifra es 0), debido a que los tipos de tendencia que se establecen en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** son específicos y tienen una única interpretación dependiendo del caso que se cite.

Tabla 19. Tendencias generadas por el OIR (6M-3M-1M) para los Modos de falla

CASO	RESULTADO	CONDICIONAL	TENDENCIA
CASO 1	OIR (1M) > OIR (3M) > OIR (6M)	NINGUNO	Creciente

CASO 2	OIR (6M) > OIR (3M) > OIR (1M)	OIR (1) ≠ 0	Recurrente con mejoría
CASO 3	OIR (6M) > OIR (1M) > OIR (3M)	NINGUNO	Decreciente con efecto tardío
CASO 4	OIR (3M) > OIR (6M) > OIR (1M)	NINGUNO	Decreciente
CASO 5	v (1M) > OIR (6M) > OIR (3M)	NINGUNO	Creciente con efecto tardío

Fuente: Elaboración propia, 2022

### 10. Interpretar tendencias de los datos obtenidos en cada Modo de falla

En este último paso se pretende interpretar el resultado de lo hecho anteriormente, para mostrar la existencia de diferentes tendencias por cada Modo de falla analizado y que servirá de herramienta para la toma de decisiones en los programas de seguimiento que orientan a la confiabilidad de una flota de aviones específica.

Para el mes analizado en los numerales anteriores (Julio), la interpretación de los casos presentados por cada Modo de falla se expresa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 20. Interpretación el OIR (6M-3M-1M) para los Modos de falla de cada ATA

ATA	MODO DE FALLA	CASO
ATA 24	INVERTER	CASO 1
	GENERATOR	CASO 1
	STARTER GEN	CASO 1
ATA 34	RADAR	CASO 1
	WX	CASO 1
ATA 73	FUEL TEMP HI	CASO 2
	EEC FAULT	CASO 5
	FUEL NOZZLES	CASO 5

Fuente: Elaboración propia, 2022

De acuerdo con los resultados obtenidos se pueden identificar las tendencias generadas por cada Modo de falla según dictan los casos citados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, siendo esta una herramienta de análisis clave para el seguimiento y control de los mismos a partir del OIR, además estos datos se deben tener en cuenta como base para la conformación de un programa de confiabilidad.

## **5. Conclusiones y Recomendaciones**

### **5.1 Conclusiones**

Se encontraron las teorías y metodologías más relevantes, las cuales a través del estudio y análisis de su evolución coadyuvaron a la construcción de la base conceptual y practica del presente proyecto, derivando en el establecimiento de parámetros y elementos, con fundamentos técnicos que interactúan en un sistema lógico con el fin de contribuir a la determinación del grado de Confiabilidad de las aeronaves comerciales en Colombia.

De acuerdo a la delimitación del sistema propuesto, se estableció un conjunto de parámetros y criterios para determinar la severidad e impacto de las interrupciones operacionales, así como la correspondiente identificación de los sistemas críticos que pueden afectar la Confiabilidad técnica de las aeronaves.

Se diseñó un sistema de identificación, seguimiento y control efectivo orientado a la confiabilidad operacional de una flota de aviones, que clasifica el Severity Index por ATA y permite mostrar de manera detallada los Modos de Falla de mayor impacto, y las tendencias que estos generan por medio del Roll Average, siendo esta una herramienta fundamental para la toma de decisiones en los programas de confiabilidad técnica de aerolíneas colombianas.

## 5.2 Recomendaciones

Se debe contar con los datos de los eventos de demora en cada periodo a evaluar como: fecha, hora, tiempo e identificación del tipo de fallas a analizar entre otros descritos en el trabajo, para este caso particular el código 41, estableciendo el alcance y el impacto de las decisiones producto de la interpretación de la información resultante.

De aplicar el Roll Average para identificar tendencias, se debe garantizar la existencia de un histórico de al menos 6 meses por cada Modo de Falla analizado.

Se recomienda este sistema de analisis, ya que es una herramienta útil en la verificación de la Confiabilidad a través de métodos técnicos que orienten una mejor toma de decisiones.

## 6. Referencias

Acuña, J. (2003). *Ingeniería de Confiabilidad*.

Aeronáutica Civil de Colombia. (2017). Comportamiento tráfico de pasajeros en 2016. *La Aviación en Cifras*, 9-15. Obtenido de <https://www.aerocivil.gov.co/Potada/revi.pdf>

AIRBUS. (2018). *A320 Fam WATCHTOWER REPORT*.

AIRBUS. (2019). *IN-SERVICE RELIABILITY DATA REPORTING*.

AIRBUS. (5 de 11 de 2022). <https://www.airbus.com/en>. Obtenido de <https://aircraft.airbus.com/en/services/enhance/skywise/digital-solutions>

- Alvarez, Lozano, & Bravo. (2022). *Metodología para el mantenimiento predictivo de transformadores de distribución basada en aprendizaje automático*.
- Anderson. (1990).
- Boeing. (2014). Maintenance Reliability and Cost Analysis Seminar. Los Angeles.
- Braglia, Castellano, & Gallo. (2018). *Un enfoque operativo novedoso para el mantenimiento de los equipos: TPM y RCM trabajando juntos*.
- C, R. (2012). *Análisis de Confiabilidad de la Flota de Aeronaves de la Escuela de Aviación del Pacífico*. Universidad de San Buenaventura. Obtenido de <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/69049.pdf>
- Cárcel, F. (2016). Características de los Sistemas TPM y RCM en la Ingeniería del Mantenimiento. *3C Tecnología*, 68-75.
- Creswell, J. (2013). *Research Design Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (4 ed.). London: SAGE Publications.
- FAA, U. (2018). *Reliability Program Methods—Standards for Determining Time Limitations*.
- Fuerza Aerea Colombiana. (2020). *Manual de Confiabilidad Aeronautica*.
- Government of Canada. (19 de 11 de 2019). *tc.canada.ca*. Obtenido de Airworthiness Manual Advisory (AMA) No. 571.101/1: Appendix B: <https://tc.canada.ca/en/aviation/reference-centre/airworthiness-manual-advisories-aircraft-maintenance-manufacturing-branch-advisory-circulars/airworthiness-manual-advisory-ama-no-571101-1-appendix-b>
- Gutierrez, H. (2010). *Calidad Total y Productividad*. Ciudad de México: Mc Graw Hill.
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta Edición ed.). McGraw-Hill Higher Education.
- Higgins, Mobley, & Wikoff. (2008). *Maintenance Engineering Handbook*. McGraw-Hill Professional. <https://www.asap-aerospace.com>. (15 de 10 de 2022). Obtenido de <https://www.asap-aerospace.com/ata-chapters/>
- Jiménez, F. (2015). *UF2237: Mantenimiento Preventivo de Sistemas de Automatización Industrial* (1 ed.). Andalucía.
- Kinnison, & Siddiqui. (2013). *Aviation Maintenance Management* (2nd Edition ed.). McGraw-Hill Education.
- Moubray, J. (2004). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. North Carolina: Aladon LLC.
- Perez. (2003). *El Camino hacia el RCM - Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*.
- Pérez, F. (2021). *Conceptos Generales en la Gestión del Mantenimiento Industrial*. Bucaramanga: Ediciones USTA.
- Pino, E. R. (2014). *Mejora del proceso productivo de una aeronave con Análisis de Criticidad según RPN y Análisis Causa Raíz*. Sevilla.

- Raheja, D. G. (2012). *Design for reliability*. John Wiley & Sons, Incorporated.
- Ramirez. (2012). *Análisis de Confiabilidad de la Flota de Aeronaves de la Escuela de Aviación del Pacífico*. Obtenido de <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/69049.pdf>
- Reyes Aguilar, P. (2006). *Curso de Confiabilidad*. Obtenido de [www.icicm.com/files/CURSO\\_CONFIABILIDAD.doc](http://www.icicm.com/files/CURSO_CONFIABILIDAD.doc)
- Senge, P. (1994). *The Five Discipline*.
- SOFEMA Aviation Services. (2 de 11 de 2022). <https://sassofia.com>. Obtenido de <https://sassofia.com/blog/msg-3-aircraft-inspection-considerations/>
- U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration. (19 de 12 de 2018). [faa.gov](http://faa.gov). Obtenido de [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/advisory\\_circulars/index.cfm/go/document.information/documentID/1035253](https://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentID/1035253)
- Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. (2020). *RAC 1*.

## **7. ANEXOS**

Anexo A. Códigos de Demoras

Anexo B. Códigos ATA

Anexo C. Porcentaje de contribución ATA al Severuty Index de cada mes