



**Universidad  
Europea**

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

Universidad Europea de Madrid

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

## **Trabajo de Fin de Máster**

Análisis de los incidentes de pérdida de separación entre las  
aeronaves utilizando el modelo SOAM de EUROCONTROL

2022-2023

Álvaro Romero Gutiérrez

Tutor

Schon Liang Cheng

---

## 1. ABSTRACTO

El análisis de incidentes aéreos es una herramienta vital para mejorar la seguridad operacional. La recopilación de información a partir de incidentes aéreos puede ayudar a identificar áreas de mejora en el sistema de aviación y en la toma de decisiones. El análisis de incidentes también puede ayudar a prevenir posibles incidentes y accidentes futuros, ya que puede señalar los patrones y tendencias que deben ser corregidos. La colaboración y el intercambio de información entre las partes involucradas en el análisis de incidentes aéreos son fundamentales para garantizar que se tomen medidas correctivas eficaces.

En los siguientes apartados de este trabajo se describe la evolución histórica de las técnicas de investigación de incidentes y accidentes aéreos, con el objetivo de poner en contexto los beneficios que presenta el modelo SOAM propuesto por Eurocontrol.

Además, se ha realizado un análisis de los incidentes aéreos de pérdida de separación de severidad (A) utilizando esta metodología. A continuación, se han comparado los resultados de este estudio con los obtenidos del análisis llevado a cabo con la metodología ADREP. El objetivo de esta comparación ha sido el estudio de la compatibilidad de estos dos modelos y la yuxtaposición de las conclusiones obtenidas con cada modelo.

**Palabras clave:** Análisis de incidentes, SOAM, pérdida de separación, ADREP, severidad A y compatibilidad.

## ÍNDICE GENERAL

1. ABSTRACTO . . . . .	1
2. INTRODUCCIÓN. . . . .	7
2.1. Factores Impulsores . . . . .	7
2.2. Objetivo . . . . .	9
2.3. Estructura y Planificación . . . . .	10
3. ESTADO DEL ARTE & MARCO TEÓRICO . . . . .	12
3.1. Características de los Modelos y Sistemas. . . . .	12
3.1.1. Sistemas Técnicos y Socio-técnicos . . . . .	12
3.1.2. Características de los sistemas Complejos . . . . .	13
3.1.3. Clasificación de Modelos basada en la Evolución de Safety . . . . .	14
3.2. La Evolución de los Modelos de Accidentes . . . . .	16
3.2.1. La Era de la Tecnología . . . . .	16
3.2.2. La Era de los Factores Humanos . . . . .	17
3.2.3. La Era de la Gestión de la Seguridad. . . . .	19
3.2.4. La Era de la Integración y la Adaptación . . . . .	20
3.3. Particularidades de los Incidentes ATM . . . . .	21
3.4. Introducción de los Modelos: SOAM y ADREP . . . . .	25
3.4.1. Definición del Modelo SOAM y sus Objetivos . . . . .	25
3.4.2. Modelo ADREP y Comparación con el Modelo SOAM . . . . .	30
4. METODOLOGÍA . . . . .	33
4.1. Selección de Incidentes . . . . .	33
4.2. Proceso de Análisis . . . . .	36
4.2.1. Análisis SOAM de Informe . . . . .	37
4.2.2. Creación de la Base de Datos SOAM . . . . .	47
4.2.3. Correlación SOAM-ADREP . . . . .	49
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS . . . . .	50
5.1. Introducción: Presuposiciones y Sesgo de Supervivencia . . . . .	50

5.2. Resultados SOAM . . . . .	51
5.2.1. Estudio de Fallos de Barreras . . . . .	51
5.2.2. Estudio de la Implicación Humana . . . . .	55
5.2.3. Estudio de las Condiciones Contextuales . . . . .	58
5.3. Ruta de Fallo . . . . .	62
5.4. Resultados ADREP y Comparación Entre Modelos . . . . .	66
5.4.1. Estudio de los Eventos. . . . .	66
5.4.2. Estudio de los Factores Descriptivos . . . . .	68
5.4.3. Comparación Entre Modelos . . . . .	70
6. CONCLUSIONES & TRABAJOS FUTUROS. . . . .	72
7. MARCO SOCIO-ECONÓMICO . . . . .	75
7.1. Costes Humanos . . . . .	75
7.2. Coste de Hardware y Software . . . . .	76
7.3. Coste Total del Proyecto. . . . .	77
8. BIBLIOGRAFÍA . . . . .	78
9. APÉNDICE . . . . .	80
9.1. Hoja de Cálculo . . . . .	80



## ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Diagrama de Gantt . . . . .	11
3.1	Diagrama de Perrow: Interactividad y Acoplamiento [10] . . . . .	21
3.2	Diagrama de Perrow: Manejabilidad y Acoplamiento [10] . . . . .	22
3.3	ATM: Características de Modelo Matemático [1] . . . . .	24
3.4	Modelo James Reason [3] . . . . .	26
3.5	Esquema SOAM [1] . . . . .	28
3.6	Diagrama de Árbol ADREP [39] . . . . .	30
3.7	Ejemplo ADREP en Informe CEANITA [39] . . . . .	31
4.1	Matriz de Riesgo Genérica . . . . .	33
4.2	Modelo SHELL [39] . . . . .	37
5.1	Sesgo de Supervivencia . . . . .	50
5.2	Distribución de los Fallos de Barreras . . . . .	51
5.3	Distribución de los Fallos de Barreras: Restricción . . . . .	52
5.4	Distribución de los Fallos de Barreras: Conocimiento . . . . .	52
5.5	Distribución de los Fallos de Barreras: Detección . . . . .	53
5.6	Distribución de la Implicación Humana . . . . .	55
5.7	Distribución de la Implicación Humana: Interpretación . . . . .	55
5.8	Distribución de la Implicación Humana: Elección de Objetivo . . . . .	56
5.9	Distribución de las Condiciones Contextuales . . . . .	58
5.10	Distribución de las Condiciones Contextuales: Limitaciones Humanas de Rendimiento . . . . .	59
5.11	Distribución de las Condiciones Contextuales: Condiciones del Lugar de Trabajo . . . . .	60
5.12	Ruta de Fallo - Restricción . . . . .	62
5.13	Ruta de Fallo - Detección y Resolución de Conflicto . . . . .	64
5.14	Distribución de los Eventos . . . . .	66
5.15	Distribución de los Eventos: Operación de Aeronave . . . . .	67

5.16	Distribución de los Eventos: Servicios de Navegación Aérea . . . . .	67
5.17	Distribución de los Factores Descriptivos . . . . .	68
5.18	Distribución de los Factores Descriptivos: Operación de Aeronave . . . .	68
5.19	Distribución de los Factores Descriptivos: ATM . . . . .	69
5.20	Distribución de los Factores Descriptivos: ATM - Operaciones ATM . . .	69
5.21	Distribución de los Factores Descriptivos: ATM - Servicios ATM . . . . .	70

## ÍNDICE DE CUADROS

3.1	Ejemplo de Código de Evento . . . . .	31
3.2	Ejemplo de Código de Factor Descriptivo . . . . .	31
4.1	Esquema de Clasificación de Severidades . . . . .	34
4.2	Condiciones del Lugar de Trabajo . . . . .	43
4.3	Clima Organizacional . . . . .	44
4.4	Actitudes y Factores Personales . . . . .	44
4.5	Limitaciones del Rendimiento Humano . . . . .	44
4.6	Factores Fisiológicos y Emocionales . . . . .	45
7.1	Desglose de costes: Ingeniero Senior . . . . .	75
7.2	Desglose de costes: Ingeniero Junior . . . . .	76
7.3	Desglose de Coste de Equipo . . . . .	76
7.4	Desglose de coste total . . . . .	77

## 2. INTRODUCCIÓN

### 2.1. Factores Impulsores

El razonamiento causa-efecto es un enfoque fundamental para la investigación de accidentes e incidentes aéreos [1]. Se basa en la idea de que todo evento es causado por una serie de factores que interactúan entre sí y que, a través del análisis de estas causas, es posible identificar las medidas necesarias para prevenir que se produzcan de nuevo.

El investigador debe adoptar una perspectiva sistemática y rigurosa para analizar las causas de un accidente o incidente. A menudo se utilizan modelos o metodologías específicas para guiar la investigación y asegurar que se consideren todos los factores relevantes. La consideración de los factores humanos, los sistemas técnicos y socio-técnicos, y los factores organizacionales y culturales son elementos esenciales en este proceso.

Una línea de pensamiento importante es el análisis de los sistemas técnicos y socio-técnicos. Los sistemas de aviación son complejos, ya que incluyen la aeronave, la tripulación, el entorno operativo y el sistema de gestión del tráfico aéreo, son susceptibles a fallos, y el investigador debe examinar cómo estos sistemas interactúan y cómo los fallos en un sistema pueden afectar a otros [5].

A medida que la industria ha ido evolucionando, y los fallos relacionados con los aspectos técnicos de la aviación han ido disminuyendo, los modelos de investigación se han adaptado para poner un mayor énfasis en el análisis de los factores humanos [3]. Los errores humanos son una causa frecuente de accidentes e incidentes, y es importante entender cómo los factores humanos pueden influir en las acciones de los pilotos, controladores de tráfico aéreo y otros miembros del equipo de aviación.

Además, el investigador debe considerar factores organizacionales y culturales que puedan haber influido en el accidente o incidente [1]. Esto puede incluir la cultura de la organización, los procesos de toma de decisiones, la formación y capacitación de la tripulación y otros factores relacionados con la gestión de la seguridad [1].

Es importante destacar que la investigación de incidentes no es una forma de culpar ni castigar a los responsables, sino que trata de identificar los fallos del sistema que permitieron que el incidente ocurriera en primer lugar. Los fallos latentes, como la falta de capacitación adecuada, la falta de mantenimiento preventivo o la falta de supervisión, pueden estar presentes en el sistema mucho antes del incidente, y pueden ser corregidos para evitar que se repita en el futuro.

Por lo tanto, el objetivo principal de la investigación de incidentes es identificar las causas subyacentes y proponer medidas para prevenir su recurrencia. Al abordar los fallos latentes subyacentes, las organizaciones pueden mejorar su capacidad para identificar y mitigar los riesgos y aumentar la seguridad operacional.

La investigación de incidentes aéreos es una herramienta importante para mejorar la seguridad operacional. A través del análisis detallado de los factores que contribuyeron a un incidente, los investigadores pueden identificar los fallos latentes subyacentes y proponer medidas para prevenir su recurrencia en el futuro. Al centrarse en la mejora del sistema en lugar de culpar a los individuos, la investigación de incidentes puede ayudar a las organizaciones a identificar y mitigar los riesgos y mejorar la seguridad operacional en general [1].

Es por este motivo que Eurocontrol propuso el modelo SOAM (Systemic Occurrence Analysis Methodology), creado en respuesta a la necesidad de una metodología de investigación de incidentes aéreos que permitiera comprender los fallos latentes subyacentes en los sistemas y procesos en vez de centrarse únicamente en los errores humanos o mecánicos inmediatos [1].

La metodología SOAM se basa en la idea de que los incidentes aéreos no son causados por un solo fallo, sino por una serie de fallos que interactúan y se combinan en una secuencia particular para producir el incidente. Por lo tanto, SOAM se enfoca en identificar estos fallos latentes subyacentes. La metodología utiliza técnicas de análisis de sistemas para identificar y evaluar los factores contribuyentes que llevaron al incidente, y luego desarrolla recomendaciones para corregir estos fallos y mejorar la seguridad operacional en el futuro [1].

## 2.2. Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es el análisis de los incidentes aéreos de pérdida de separación categorizados con el nivel de severidad (A) utilizando la metodología SOAM (Systemic Occurrence Analysis Methodology). Este estudio se realizará siguiendo los siguientes pasos:

- Investigación y documentación del modelo SOAM en el contexto de los incidentes aéreos.
- Análisis de los incidentes de pérdida de separación en vuelo categorizados con severidad (A) aplicando el modelo SOAM.
- Creación de una base de datos donde compilar todos los factores contribuyentes encontrados utilizando este método.
- Estudio estadístico de los datos encontrados y extracción de conclusiones.
- Convergencia entre los modelo SOAM y ADREP.
- Estudio estadístico de los eventos y factores descriptivos descritos con el modelo ADREP.
- Obtención de conclusiones acerca de la compatibilidad entre los dos modelos.
- Definición de trabajos futuros.

### 2.3. Estructura y Planificación

En cuanto a la estructura del proyecto, se ha dividido esta memoria en los siguientes apartados:

1. **Abstracto:** Esta breve descripción sirve como resumen del contexto y el objeto de estudio del proyecto.
2. **Introducción:** En esta sección se definen los factores impulsores, objetivos y planificación del proyecto.
3. **Estado del Arte y Marco Teórico:** La función de este apartado es proveer una descripción detallada de la historia y el estado actual del sector de estudio, así como una definición de los modelos a utilizar.
4. **Metodología:** El cuarto apartado de este trabajo se centra en definir los pasos a seguir en la realización del estudio de este informe. Desde la selección de incidentes a estudiar, hasta la creación de la base de datos a través del método de análisis de los casos de pérdida de separación.
5. **Análisis de Resultados:** Esta sección expone los resultados obtenidos de los estudios realizados, describiendo su significado y extrayendo información relevante.
6. **Conclusiones y Trabajos Futuros:** Este apartado incluye una recapitulación de las conclusiones obtenidas del análisis de los resultados y propone futuros trabajos en el sector.
7. **Marco Socio-Económico:** En esta sección se incluyen los datos económicos relacionados con la elaboración del proyecto.
8. **Bibliografía**
9. **Apéndice**

La realización de este proyecto requiere un uso estructurado y eficiente del tiempo disponible. La herramienta utilizada para recoger y representar la organización adoptada es el diagrama de Gantt incluido a continuación.

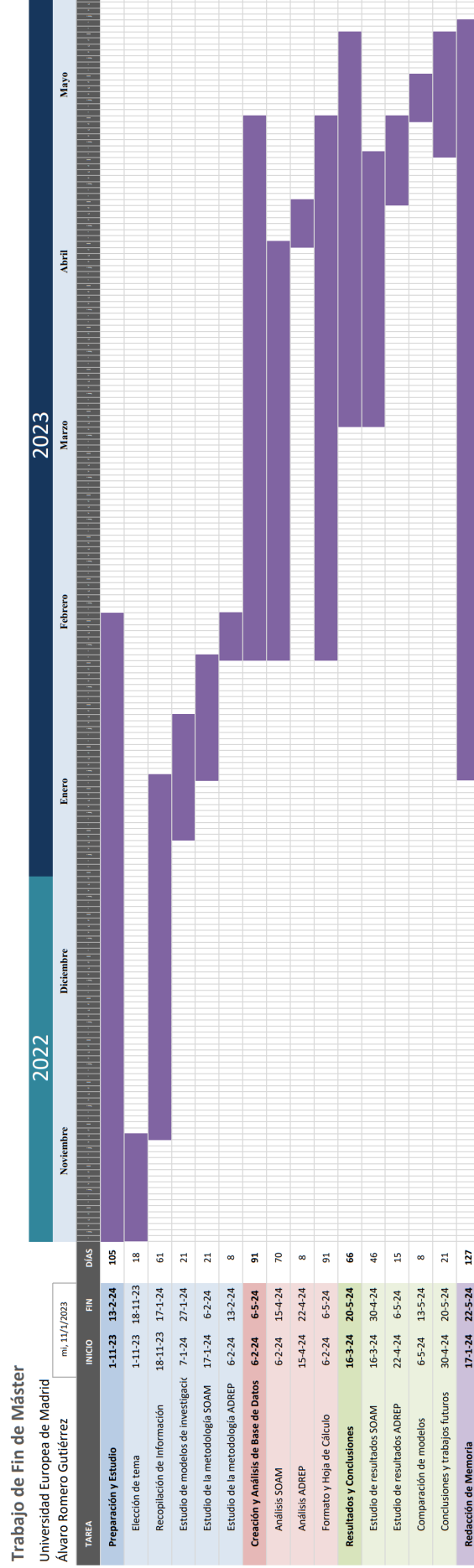


Fig. 2.1. Diagrama de Gantt



## 3. ESTADO DEL ARTE & MARCO TEÓRICO

### 3.1. Características de los Modelos y Sistemas

#### 3.1.1. Sistemas Técnicos y Socio-técnicos

Los modelos técnicos y socio-técnicos son enfoques conceptuales utilizados para comprender y analizar sistemas complejos. Aunque comparten ciertas similitudes, también presentan diferencias fundamentales en su enfoque y alcance.

Un modelo técnico se centra principalmente en los aspectos técnicos y tecnológicos de un sistema. Se enfoca en los componentes físicos, mecánicos y tecnológicos, así como en las interacciones entre ellos. Este enfoque se basa en la idea de que los problemas en un sistema se pueden resolver mejor a través de mejoras técnicas, como la optimización de los procesos, la implementación de nuevas tecnologías o la actualización de equipos. Los modelos técnicos se suelen aplicar para identificar muchos sistemas idénticos, descritos por componentes y subsistemas y pudiendo analizar los riesgos de cada componente individual. Están categorizados por su predictibilidad, linealidad y proporcionalidad entre las causas y sus efectos [7].

Por otro lado, un modelo socio-técnico reconoce que los sistemas son inherentemente sociales y tecnológicos [9]. Considera tanto los aspectos técnicos como los factores sociales, humanos y organizativos que influyen en el funcionamiento y desempeño de un sistema. Este enfoque reconoce la interacción compleja entre las personas, las organizaciones, la tecnología y el entorno en el que operan. Los modelos socio-técnicos buscan comprender cómo los aspectos sociales, como la cultura organizativa, las habilidades y actitudes de las personas, y la dinámica de las interacciones humanas, pueden afectar el rendimiento y la seguridad de un sistema. Este enfoque se utiliza a menudo en áreas como la gestión de riesgos, la seguridad laboral y la psicología organizacional [8]. En contraste con los modelos técnicos, los modelos socio-técnicos suelen ser únicos, estar divididos por funciones y objetivos en lugar de componentes y por ello la imposibilidad de la descomposición del trabajo. La relación compleja entre los efectos y las causas está determinada por la no predictibilidad y no linealidad de estos modelos.

En el caso del sistema de gestión del tráfico aéreo (ATM, por sus siglas en inglés), se puede considerar como un ejemplo de un sistema socio-técnico. La ATM no solo implica la coordinación y supervisión de las operaciones técnicas, como el control del tráfico aéreo y la gestión de las comunicaciones y la navegación, sino que también involucra aspectos sociales y organizativos, como las regulaciones, los procedimientos operativos, la capacitación del personal y la interacción entre los controladores de tráfico aéreo, los pilotos, los proveedores de servicio de navegación aérea (ANSP) y las aerolíneas. El enfoque socio-técnico es esencial para comprender y abordar los desafíos relacionados con

la seguridad, la eficiencia y la adaptación del sistema ATM a medida que evoluciona.

Otro ejemplo de un sistema socio-técnico es la operación de centrales nucleares. Además de los aspectos técnicos y tecnológicos involucrados en la generación de energía nuclear, también se deben considerar factores sociales, como la seguridad, la gestión de riesgos, la cultura de seguridad, la capacitación del personal y la participación de la comunidad. Estos elementos sociales y organizativos son críticos para garantizar la seguridad y minimizar los riesgos asociados con la operación de las centrales nucleares. Esta industria fue central en la evolución de los modelos de investigación de sistemas socio-técnicos a finales del siglo XX, como se describirá a continuación.

Los modelos técnicos y socio-técnicos ofrecen enfoques diferentes pero complementarios para comprender y abordar los desafíos de los sistemas complejos. Mientras que los modelos técnicos se centran en los aspectos técnicos y tecnológicos, los modelos socio-técnicos consideran también los factores sociales y organizativos. Tanto el sistema de gestión del tráfico aéreo como la operación de centrales nucleares pueden clasificarse como sistemas socio-técnicos debido a la interacción entre los aspectos técnicos y sociales inherentes a su funcionamiento.

### **3.1.2. Características de los sistemas Complejos**

Según la literatura revisada de Perrow, Hollnagel y Wienen [10], [11], [12], un sistema puede caracterizarse por propiedades como la interactividad, la manejabilidad y la integridad (acoplamiento) entre sus componentes. Estas propiedades son fundamentales para comprender la naturaleza y el comportamiento de los sistemas complejos.

La interactividad se refiere a la manera en que los componentes de un sistema interactúan entre sí. Esto implica que los cambios o eventos en un componente pueden tener efectos en otros componentes dentro del sistema. La interactividad puede ser tanto directa, donde los componentes interactúan directamente entre sí, como indirecta, donde las interacciones son mediadas por otros componentes o factores.

La manejabilidad se relaciona con la capacidad de gestionar y controlar los componentes del sistema. Esto implica tener mecanismos y recursos adecuados para supervisar, regular y tomar decisiones sobre el funcionamiento del sistema. Una alta manejabilidad se asocia con la capacidad de adaptarse y responder eficazmente a cambios, desafíos o perturbaciones en el entorno del sistema.

La integridad o acoplamiento se refiere al grado en que los componentes de un sistema dependen entre sí. Un alto nivel de integridad implica que los componentes están estrechamente acoplados y son altamente interdependientes. Esto significa que un fallo o problema en un componente puede propagarse rápidamente a otros componentes, afectando así el funcionamiento global del sistema.

Estas propiedades son fundamentales para comprender la dinámica y la resiliencia de los sistemas complejos, especialmente en entornos de alta complejidad y riesgo. Al

analizar la interactividad, la manejabilidad y la integridad de un sistema, se puede obtener una visión más profunda de su funcionamiento y de los posibles desafíos que pueden surgir.

### **3.1.3. Clasificación de Modelos basada en la Evolución de Safety**

La clasificación de los modelos de incidentes y accidentes se puede hacer en tres categorías principales: secuencial, epidemiológico y sistémico. Estos enfoques proporcionan diferentes perspectivas para analizar y comprender los incidentes y accidentes, permitiendo identificar las causas y contribuyentes subyacentes. A continuación, se explican brevemente cada uno de estos modelos.

#### **Modelo Secuencial**

Este modelo se basa en la idea de que los incidentes y accidentes ocurren como resultado de una secuencia de eventos. Se centra en identificar las etapas o pasos que condujeron al incidente o accidente, analizando cómo se desarrollaron y cómo se combinaron para producir el resultado no deseado. El modelo secuencial busca identificar las causas inmediatas y los factores contribuyentes en cada etapa de la secuencia. El objetivo es identificar los fallos o desviaciones en la secuencia de eventos y proponer medidas correctivas para prevenir la recurrencia. En este modelo el fallo humano se trata como un componente. Es posible emplear puertas lógicas para combinar eventos dentro de otros eventos y permite añadir barreras para evitar que eventos o sucesos se conviertan en accidentes [4], [11], [9].

#### **Modelo Epidemiológico**

Modelo Epidemiológico: Este modelo se basa en el enfoque de la epidemiología, aplicado a la investigación de incidentes y accidentes. Se centra en analizar las estadísticas y datos recopilados de una amplia gama de incidentes y accidentes para identificar patrones, tendencias y factores de riesgo comunes. El modelo epidemiológico busca entender la frecuencia, distribución y características de los incidentes y accidentes en una población determinada. Esto permite identificar factores de riesgo y áreas problemáticas que requieren intervención y prevención. Este modelo considera que los comportamientos de los actores o agentes del sistema están condicionados por sus organizaciones y los eventos son explicados como consecuencias de las acciones de estos actores o agentes del sistema. La degradación de barreras y defensas se explica a través de una combinación de fallos simples con condiciones latentes [4], [11], [9].

#### **Modelo Sistémico**

Este modelo se basa en el enfoque de los sistemas complejos, reconociendo que los incidentes y accidentes son el resultado de una combinación de factores interrelacionados. Se centra en analizar las interacciones y las relaciones entre los componentes del sistema, como los factores humanos, técnicos y organizacionales. El modelo sistémico busca identificar los fallos y debilidades en el sistema en su conjunto, en lugar de centrarse úni-

camente en las causas inmediatas. Esto implica examinar las interacciones y retroalimentaciones entre los diferentes componentes del sistema y cómo contribuyen a la ocurrencia del incidente o accidente. El objetivo es ir más allá de los fallos de los componentes y considerar la dinámica del sistema incluyendo el análisis de los riesgos no lineales. Trata de capturar los fuertes vínculos e influencias ocultas entre los componentes del sistema [4], [11], [9].

Cada uno de estos modelos tiene sus ventajas y limitaciones:

El modelo secuencial proporciona un enfoque detallado para identificar las causas inmediatas y los factores contribuyentes en una secuencia de eventos. Es un modelo fácil de entender que permite una comunicación sencilla de la red causal que lleva al incidente. Sin embargo, está limitado por no tener en cuenta el contexto socio-técnico, solamente es capaz de identificar mejoras claras y simples y está limitado a la hora de describir comportamientos entre componentes a múltiples niveles.

El modelo epidemiológico permite identificar patrones y factores de riesgo a través del análisis de datos a gran escala. Tiene en cuenta el contexto socio-técnico y pone el enfoque en elementos que no pueden ser analizados por modelos secuenciales (procedimientos de seguridad). Por otro lado, requiere más tiempo y recursos debido a su enfoque más amplio y es de difícil implementación debido a la dificultad de capturar el contexto en distintas situaciones.

El modelo sistémico proporciona una visión holística de los sistemas complejos y sus interacciones. Tiene en cuenta la interdependencia de las funciones individuales y los componentes que constituyen el sistema. Sin embargo, como el modelo epidemiológico, es de difícil implementación y requiere más tiempo de investigación. Además, es difícil sacar conclusiones entre los diferentes métodos debido a la escasez de puntos en común que crea un sistema tan específico.

Es importante destacar que estos modelos no son excluyentes y pueden complementarse entre sí en el análisis de incidentes y accidentes. Al combinar estos enfoques, se obtiene una comprensión más completa y profunda de los factores que contribuyen a la ocurrencia de los incidentes y accidentes, lo que a su vez permite desarrollar estrategias más efectivas de prevención y mitigación [4], [11], [9].

## **3.2. La Evolución de los Modelos de Accidentes**

La investigación de accidentes ha evolucionado con el tiempo en respuesta a cambios en las actitudes hacia la seguridad y la introducción de nuevas tecnologías y sistemas de gestión. En general, se reconocen diferentes eras de la investigación de accidentes que corresponden a diferentes períodos de la historia: la era de la tecnología, la era de los factores humanos, la era de la gestión de la seguridad y la era de la integración y la adaptación.

### **3.2.1. La Era de la Tecnología**

Las primeras investigaciones de accidentes se centraban en identificar los fallos técnicos que pudieran ser causas directas de accidentes. Las investigaciones se realizaban por ingenieros, quienes analizaban datos relacionados con los componentes mecánicos y estructurales de los accidentes. Estas investigaciones llevaron a mejoras en el diseño, materiales y técnicas de fabricación. Este enfoque se mantuvo durante varias décadas, y la tecnología continuó desempeñando el papel principal en la explicación de los accidentes.

#### **Root Cause**

Este modelo de investigación se centra en identificar la causa raíz de un accidente. El enfoque se basa en la idea de que si se puede eliminar la causa raíz, se puede prevenir la recurrencia del accidente. El modelo busca identificar todas las causas subyacentes que contribuyeron al accidente, desde las causas inmediatas hasta las causas más profundas [13], [24].

#### **Domino**

El modelo de Domino se basa en la idea de que los accidentes son el resultado de una serie de eventos interconectados y que cada evento es un “dominó” en la secuencia que lleva al accidente. El modelo busca identificar las cadenas de eventos que condujeron al accidente y, a su vez, determinar cómo se pueden prevenir esos eventos en el futuro [14].

#### **FMEA**

El Análisis de Modo y Efecto de Falla (FMEA, por sus siglas en inglés) es una técnica que se utiliza para identificar y evaluar los posibles modos de fallo de un sistema, y para determinar las consecuencias de dichos fallos. El objetivo es prevenir los fallos del sistema antes de que ocurran, mediante la identificación y el análisis de los posibles modos de fallo [15].

## **HAZOP**

La Técnica de Operabilidad y Análisis de Peligros (HAZOP, por sus siglas en inglés) es una técnica sistemática que se utiliza para identificar los riesgos y los peligros asociados con un proceso o sistema. La técnica implica la identificación de todos los posibles escenarios de operación del sistema y la evaluación de los riesgos y peligros asociados con cada uno de ellos [16].

### **Fault Tree:**

El Análisis de Árbol de Fallas (FTA, por sus siglas en inglés) es una técnica que se utiliza para identificar y evaluar los posibles modos de falla de un sistema, y para determinar las consecuencias de dichas fallas. El modelo utiliza un diagrama de árbol para representar los diferentes eventos que pueden conducir a una falla del sistema [17].

### **3.2.2. La Era de los Factores Humanos**

Los desastres nucleares de finales de los años 70 y principios de los años 80, como el accidente de Three Mile Island en Estados Unidos en 1979, el desastre de Chernobyl en la Unión Soviética en 1986 y el accidente de Fukushima en Japón en 2011, tuvieron un impacto significativo en las técnicas y modelos de investigación de incidentes y accidentes.

Estos desastres revelaron las limitaciones de los enfoques tradicionales de seguridad y pusieron de manifiesto la necesidad de una mayor atención a los factores humanos en la prevención y gestión de incidentes y accidentes. Los errores humanos, la toma de decisiones equivocadas y la falta de comunicación efectiva fueron identificados como factores críticos en estos eventos. A medida que los avances tecnológicos hacían los sistemas más complejos, quedó claro que el error humano era a menudo un factor que contribuía a los accidentes. Los modelos de accidentes comenzaron a centrarse en la identificación y mitigación de los factores humanos, tales como la fatiga, el estrés y los sesgos cognitivos que contribuyen a los accidentes.

Como resultado, se produjo un cambio de paradigma en la investigación de incidentes y accidentes, donde se comenzó a dar un mayor énfasis en los factores humanos y se reconocieron como elementos clave para comprender las causas subyacentes de los incidentes.

Se desarrollaron organizaciones, modelos y enfoques específicos para abordar los factores humanos en la investigación de incidentes. A partir de este momento, los modelos de investigación de incidentes y accidentes en los sistemas socio-técnicos aeroespaciales estuvieron influenciados por aquellos desarrollados para la industria nuclear. Algunos de los ejemplos más destacados incluyen:

## **CSNI**

Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI) es un comité de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) que se enfoca en la seguridad de las instalaciones nucleares. Este comité desarrolla directrices y recomendaciones para mejorar la seguridad en la industria nuclear, incluyendo la investigación y análisis de accidentes [18].

## **FMECA**

Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA) es un método sistemático utilizado para identificar los modos de falla potenciales en un sistema o proceso elaborado a partir del modelo FMEA. Mientras que el FMEA se centra en la identificación y evaluación de modos de fallo y sus efectos, el FMECA va más allá al agregar una evaluación de la criticidad, considerando la probabilidad de ocurrencia, la gravedad de los efectos y la capacidad de detección. El FMECA proporciona una evaluación más completa y precisa de los riesgos asociados con los modos de fallo, lo que permite una mejor toma de decisiones en la gestión del riesgo.

## **THERP**

(Técnica de Evaluación de Riesgos Humanos Probabilística) es un método utilizado para evaluar el riesgo de errores humanos en sistemas complejos. Se basa en un análisis de tareas detallado para identificar las situaciones en las que es más probable que ocurran errores humanos, y luego se utiliza un modelo probabilístico para estimar la probabilidad de que ocurran dichos errores. Este método es comúnmente utilizado en la industria nuclear [40].

## **HCR**

Human-Centred Reliability (HCR) es un enfoque para el análisis de la confiabilidad que se centra en la influencia de los factores humanos. HCR se enfoca en la identificación de los factores que pueden afectar el desempeño humano, y cómo estos factores pueden afectar la seguridad y la confiabilidad de un sistema o proceso. HCR se utiliza comúnmente en la industria de la energía nuclear [20].

## **TRACER**

Technique for the Retrospective and Predictive Analysis of Cognitive Errors, TRACER es un modelo de investigación de accidentes que se centra en los errores cognitivos que pueden conducir a incidentes de seguridad. El modelo se basa en la teoría del sistema de errores y utiliza técnicas como el análisis de eventos críticos y la retroalimentación de los trabajadores para identificar los factores de riesgo y desarrollar soluciones de seguridad. TRACER se ha utilizado en la industria nuclear y de transporte, entre otras [26].

## **HERA**

Human Error and Cognitive Work Analysis, HERA es un modelo de investigación de accidentes que se centra en el análisis de la toma de decisiones humanas y los errores cognitivos que pueden conducir a accidentes. El modelo se basa en la teoría de la ergonomía cognitiva y utiliza técnicas como la entrevista cognitiva y el análisis de tareas para identificar los factores que influyen en el rendimiento humano. HERA se ha utilizado en la industria nuclear y aeroespacial, entre otras [11].

## **AEB**

Accident and Error Basic, AEB es un modelo de investigación de accidentes que se utiliza en la industria aeronáutica y se centra en la identificación de los factores que contribuyen a los accidentes y errores de aviación. El modelo se basa en la teoría del sistema de errores y utiliza técnicas como el análisis de eventos críticos y la retroalimentación de los pilotos para identificar los factores de riesgo y desarrollar soluciones de seguridad [27].

### **3.2.3. La Era de la Gestión de la Seguridad**

A finales del siglo XX, las organizaciones comenzaron a reconocer la importancia de los sistemas de gestión de la seguridad en la prevención de accidentes. La atención se desplazó hacia la prevención de accidentes mediante la identificación y corrección de fallas organizacionales y de gestión que podrían contribuir a los accidentes. Los modelos de accidentes comenzaron a enfocarse en el análisis de la cultura de seguridad, el liderazgo y la toma de decisiones. También surgieron nuevos modelos como el modelo de Aprendizaje de la Seguridad. Esto resultó en el establecimiento de regulaciones, estándares y directrices de seguridad.

## **HPES**

Human Performance Event Simulation (HPES) es un método utilizado para simular situaciones de alto riesgo en un entorno controlado, con el objetivo de mejorar la comprensión de los factores humanos que pueden afectar la seguridad y la confiabilidad de un sistema o proceso. HPES se utiliza comúnmente en la industria nuclear [40].

## **Swiss Cheese Model**

Este modelo propuesto por James Reason en 1990, describe cómo las organizaciones y sistemas pueden ser comparados con una serie de rebanadas de queso suizo, donde cada rebanada representa una capa de defensa contra errores y accidentes. Cada rebanada puede tener agujeros, que representan las debilidades o fallas en el sistema, pero estos agujeros no se alinean siempre, lo que significa que varios errores o debilidades en el sistema deben alinearse en una secuencia para que un accidente ocurra. Este modelo ha sido ampliamente utilizado para identificar y analizar los factores contribuyentes a los accidentes [21].



## **HEAT**

La herramienta de Evaluación de Amenazas y Riesgos de Causas Humanas (HEAT) es una técnica de análisis de riesgos centrada en la persona que se utiliza para evaluar los riesgos y las amenazas asociados con las acciones humanas. La herramienta se enfoca en cómo los trabajadores interactúan con el sistema y los procesos de trabajo, identificando los errores y las fallas en los sistemas y procesos, y cómo pueden ser mitigados. HEAT es una herramienta desarrollada por la NASA y ha sido utilizada en la industria aeroespacial y en otras industrias que requieren un alto nivel de seguridad [22], [23].

## **ATHEANA**

El Modelo ATHEANA (Análisis de Tareas y Evaluación de Riesgos de la Salud, Ergonomía, Ambiente y Nivel de Actividad) es una herramienta de análisis de riesgos que se utiliza para evaluar los riesgos asociados con las tareas de trabajo y las condiciones laborales. Este modelo tiene en cuenta los factores de salud, ergonomía, ambiente y nivel de actividad, y se enfoca en la identificación de riesgos y la implementación de medidas preventivas para controlarlos. Este modelo ha sido utilizado en la industria de la construcción y otras industrias donde se realizan tareas físicas demandantes [25].

### **3.2.4. La Era de la Integración y la Adaptación**

A partir de la década del 2000, la investigación de accidentes se convirtió en un enfoque interdisciplinario [1], que integra varios campos de estudio como la ingeniería, la psicología y la sociología. Los modelos de accidentes también comenzaron a considerar los sistemas y la complejidad en los que los accidentes ocurren.

En la era actual, las investigaciones de accidentes han evolucionado para centrarse en la mejora continua y la adaptabilidad. Se espera que las organizaciones identifiquen y respondan a los riesgos emergentes y las circunstancias cambiantes de manera proactiva. Las investigaciones se centran en identificar oportunidades de mejora y adaptarse a las condiciones cambiantes. Los modelos de accidentes se centran en la capacidad de los sistemas para adaptarse y aprender de los errores. Los investigadores se enfocan en el análisis de la resiliencia, la robustez y la flexibilidad de los sistemas.

En general, la investigación de accidentes ha evolucionado desde un enfoque técnico hacia un enfoque más integrado y adaptable, con un creciente énfasis en los factores humanos y la cultura de seguridad. Esta evolución ha sido impulsada por la introducción de nuevas tecnologías y la creciente complejidad de las organizaciones aeronáuticas.

### 3.3. Particularidades de los Incidentes ATM

Relacionando la operación de una aeronave y ATM con los apartados anteriores, la operación de una aeronave es un ejemplo claro de un sistema socio-técnico, ya que involucra tanto aspectos técnicos como sociales y organizacionales. En la operación de una aeronave, es necesario coordinar el trabajo de los pilotos, el personal de mantenimiento, los controladores de tráfico aéreo, los proveedores de servicios de tierra, entre otros. Cada uno de estos actores es un elemento clave del sistema, y sus acciones y decisiones pueden tener un impacto significativo en la seguridad y eficiencia de la operación [1].

En comparación con un sistema técnico, la complejidad de un sistema socio-técnico como la operación de una aeronave es mucho mayor. Las interacciones entre los elementos técnicos y sociales del sistema son dinámicas y cambiantes, y pueden afectar significativamente el desempeño general del sistema. Además, la operación de una aeronave implica una gran cantidad de regulaciones y procedimientos de seguridad que deben cumplirse para garantizar la seguridad de los pasajeros y la tripulación.

En cuanto a las características relacionadas con un sistema complejo (interactividad, manejabilidad e integridad o acoplamiento), estos comportamientos se pueden ver en los siguientes diagramas de Perrow:

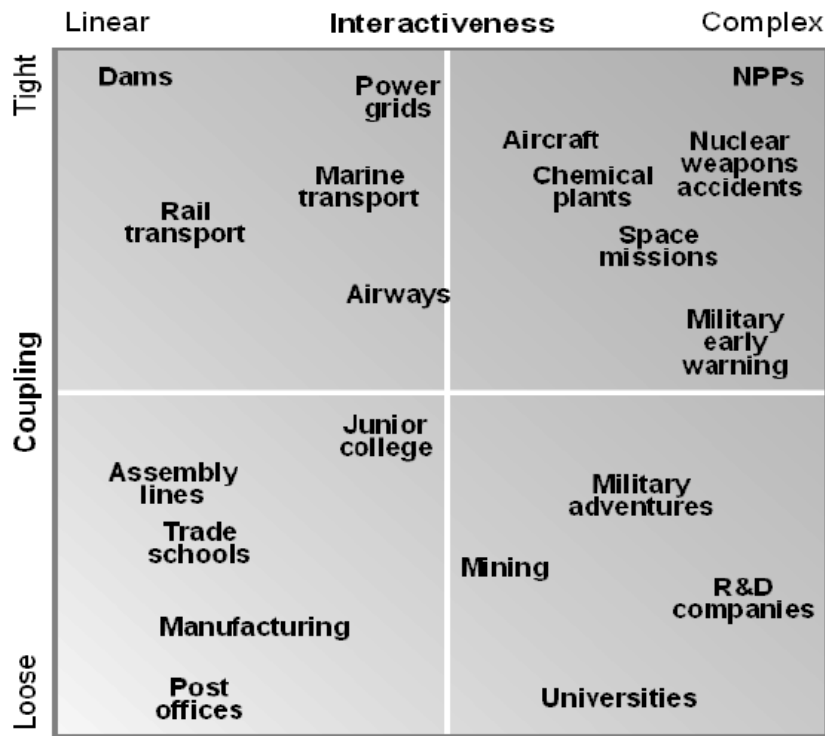


Fig. 3.1. Diagrama de Perrow: Interactividad y Acoplamiento [10]

La operación de aeronaves, especialmente durante el vuelo, implica una alta interactividad entre sus componentes. Los pilotos interactúan constantemente con los sistemas de a bordo, realizan comunicaciones con el control de tráfico aéreo y toman decisiones en tiempo real en función de la información disponible. Existen múltiples variables en juego,

como el clima, la navegación y el tráfico aéreo, que requieren una interacción constante y coordinada para garantizar la seguridad y eficiencia de los vuelos. Por lo tanto, la operación de aeronaves puede considerarse como un sistema altamente interactivo.

En cuanto al Control de Tráfico Aéreo, también implica una alta interactividad debido a la comunicación y coordinación constante entre los controladores y los pilotos. Los controladores deben gestionar de manera efectiva el flujo de tráfico aéreo, asegurando que las aeronaves se mantengan separadas y sigan rutas y procedimientos específicos. La comunicación entre controladores y pilotos es esencial para proporcionar instrucciones claras y garantizar un espacio aéreo seguro. Por lo tanto, el Control de Tráfico Aéreo también se puede clasificar como un sistema altamente interactivo.

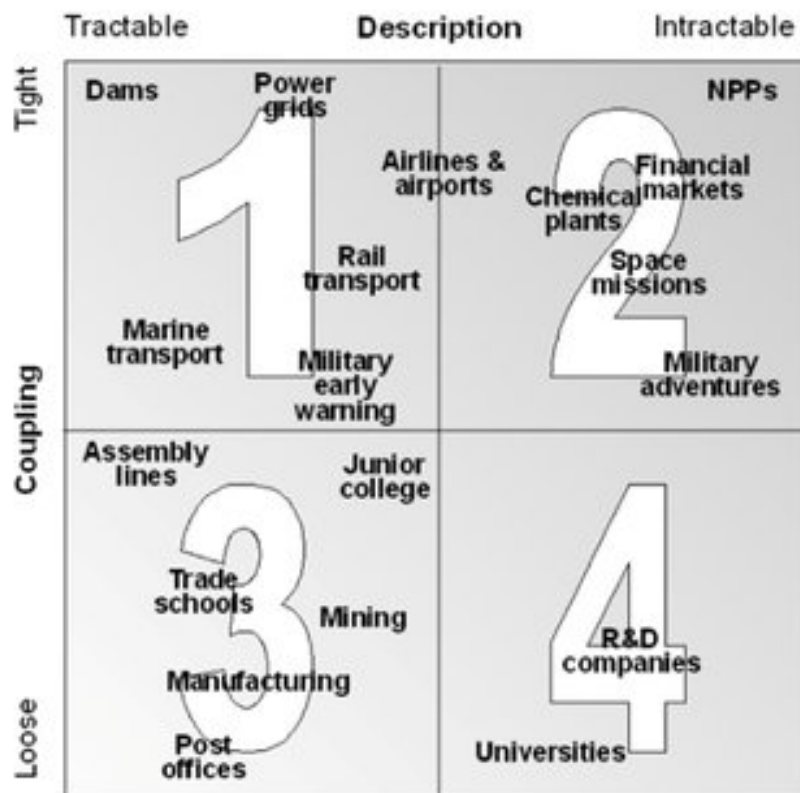


Fig. 3.2. Diagrama de Perrow: Manejabilidad y Acoplamiento [10]

En cuanto a la manejabilidad, tanto la operación de aeronaves como el Control de Tráfico Aéreo requieren una capacidad de gestión efectiva. Los pilotos deben ser capaces de manejar y controlar la aeronave en diversas situaciones y responder rápidamente a los cambios inesperados. Del mismo modo, los controladores deben ser capaces de manejar y administrar el flujo de tráfico aéreo, tomar decisiones informadas y responder a situaciones imprevistas de manera efectiva. Tanto los pilotos como los controladores deben tener habilidades y conocimientos adecuados para gestionar sus respectivas responsabilidades de manera eficiente.

En términos de integridad o acoplamiento, la operación de aeronaves y el Control de Tráfico Aéreo pueden tener diferentes niveles. La operación de aeronaves implica una

mayor dependencia de los sistemas técnicos y mecánicos, como los controles de vuelo, los sistemas de navegación y los motores. Por otro lado, el Control de Tráfico Aéreo se basa en gran medida en sistemas de comunicación, radares y software de gestión de tráfico aéreo. Ambos sistemas requieren un alto grado de integridad para garantizar que los componentes funcionen correctamente y que la información se transmita y se utilice de manera adecuada [10], [11], [12].

El sistema ATM (Air Traffic Management) se sitúa en un punto intermedio en las escalas de linealidad y incertidumbre (determinista o no determinista).

En cuanto a la linealidad, el sistema ATM es más cercano a la no linealidad, sin embargo, mientras que algunas partes del sistema pueden seguir patrones predecibles y lineales, como las trayectorias de vuelo y las reglas de separación, otras partes pueden ser más complejas y no lineales, como la gestión del tráfico en tiempo real y la toma de decisiones en situaciones de congestión o emergencia.

En términos de incertidumbre, el sistema ATM está expuesto a una mezcla de eventos deterministas y no deterministas. Hay elementos dentro del sistema que son predecibles y pueden ser modelados con cierto grado de certeza, como las condiciones meteorológicas previstas y el rendimiento de las aeronaves. Sin embargo, también existen factores impredecibles e incertidumbre inherente, como cambios repentinos en las condiciones climáticas, fallas técnicas inesperadas o decisiones humanas imprevistas [29].

El sistema ATM se encuentra en un punto de equilibrio entre la necesidad de mantener cierta linealidad y predictibilidad para garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones aéreas, y la capacidad de adaptarse y responder a la variabilidad y la incertidumbre del entorno operativo. Es un sistema altamente complejo que requiere tanto el uso de reglas y procedimientos establecidos como la capacidad de tomar decisiones flexibles y rápidas en tiempo real.

Atendiendo a esta descripción, una investigación ATM (Air Traffic Management) debe adoptar un enfoque sistémico combinado con elementos epidemiológicos. Dada la complejidad y la naturaleza interconectada de los sistemas ATM, es importante abordar las causas y los factores contribuyentes desde diferentes perspectivas para obtener una comprensión completa de los incidentes y accidentes.

El enfoque secuencial es importante para comprender la secuencia de eventos y acciones que llevaron al incidente. Esto implica analizar los eventos en orden cronológico, identificando las acciones y decisiones individuales y cómo interactuaron entre sí. Este enfoque permite comprender cómo se desarrolló la cadena de eventos y cómo las decisiones tomadas en cada etapa contribuyeron al resultado final. Sin embargo, debido a la alta no-linealidad de los incidentes ATM, este enfoque puede ser difícil o imposible de implementar sin incurrir en grandes generalizaciones.

Por otro lado, el enfoque sistémico permite analizar el sistema ATM en su conjunto, teniendo en cuenta las interacciones entre los diversos componentes, incluyendo los

aspectos tecnológicos, operativos y humanos. Esto implica examinar tanto los eventos inmediatos como las condiciones y factores subyacentes que pueden haber contribuido a la ocurrencia del incidente. El objetivo es identificar los fallos latentes en el sistema, como deficiencias en los procedimientos, la capacitación o el diseño de la infraestructura, que pueden haber creado las condiciones propicias para el incidente.

Además, el enfoque epidemiológico es relevante para analizar los incidentes y accidentes desde una perspectiva más amplia y colectiva. Esto implica examinar las tendencias y los patrones en los datos de seguridad, identificar los factores de riesgo y las características comunes de los incidentes, y buscar oportunidades de mejora a nivel sistémico. El enfoque epidemiológico proporciona una visión más global de los problemas de seguridad y puede ayudar a identificar áreas de mejora y priorizar las medidas de mitigación.

Por lo tanto, una investigación ATM efectiva debe combinar elementos del enfoque sistémico y epidemiológico para obtener una comprensión holística de los incidentes y accidentes en el sistema ATM. Esto permitirá identificar los factores contribuyentes y las deficiencias del sistema, y proporcionará información valiosa para la implementación de medidas de seguridad y la mejora continua del sistema. Este comportamiento es visible en el siguiente gráfico [30].

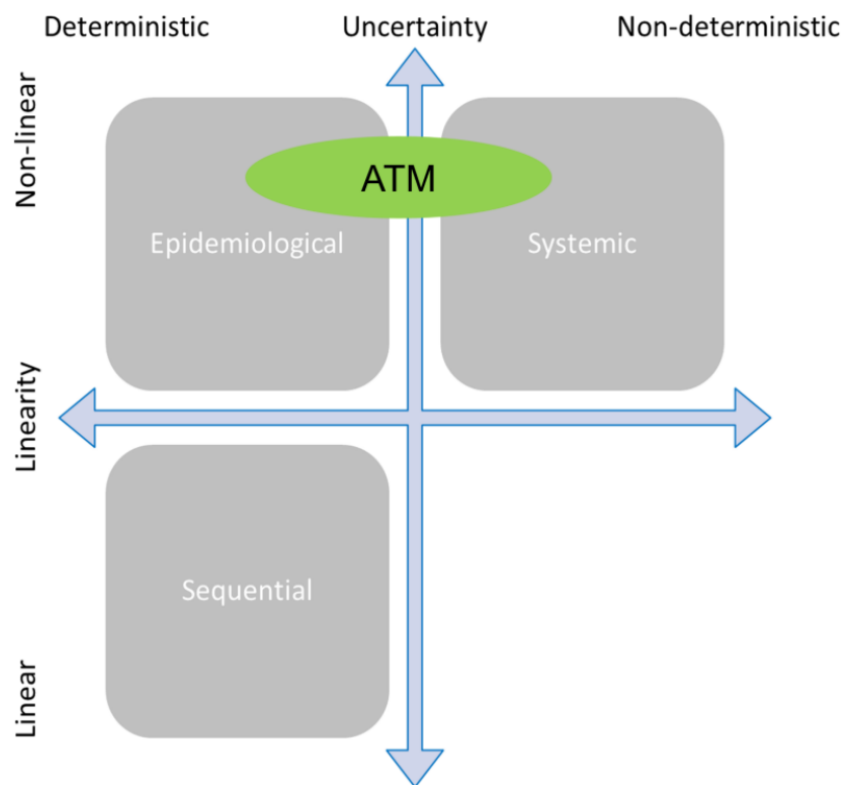


Fig. 3.3. ATM: Características de Modelo Matemático [1]

Atendiendo a las definiciones descritas antes, y teniendo en cuenta que los proveedores de servicios de Navegación Aérea (ANSPs) son organizaciones complejas, se llega a la conclusión de que requieren de una metodología específica para la gestión de la seguridad operacional. Esta metodología se basa en el modelo de James Reason de accidentes

organizacionales y se enfoca en la notificación y evaluación de las ocurrencias de seguridad operacional ATM, siguiendo el enfoque común establecido en el ESARR 2 (European ATM Safety Regulatory Requirement) [31]. El objetivo de esta metodología es ir más allá de la intervención humana y analizar las condiciones latentes más profundas dentro de la organización, sin transferir la responsabilidad de los empleados de primera línea a los altos directivos.

Cada investigación de incidentes o accidentes es diferente y debe determinarse en función del análisis de riesgo. Los accidentes de aviación, definidos por el Anexo 13 de la OACI [32], siempre deben ser investigados. Sin embargo, el nivel de investigación necesario para otras ocurrencias debe basarse en la severidad de la situación. Se aplican criterios específicos para evaluar la severidad y el riesgo de una incidencia ATM durante y después de la investigación.

Para clasificar la severidad de las ocurrencias, se utiliza un esquema establecido en el ESARR 2 Guidance Document EAM2/GUI1 [36]. Este esquema proporciona pautas para determinar el nivel de severidad y el enfoque de investigación requerido. La clasificación de severidades ayuda a priorizar y asignar recursos de manera adecuada para abordar los problemas identificados y tomar las medidas correctivas necesarias. Este esquema se definirá con mayor detalle en el apartado de “Metodología: Selección de Incidentes”.

Es importante destacar que la investigación formal no tiene como objetivo culpar a ninguna persona o departamento, sino corregir las deficiencias identificadas dentro de la organización. Se busca encontrar las causas subyacentes y las condiciones latentes que contribuyeron a la ocurrencia del incidente o accidente, y tomar medidas para evitar su repetición en el futuro. Esta mentalidad de mejora continua y aprendizaje de los errores es fundamental para fortalecer la seguridad operacional en la industria de la aviación.

### **3.4. Introducción de los Modelos: SOAM y ADREP**

#### **3.4.1. Definición del Modelo SOAM y sus Objetivos**

El modelo SOAM (Systemic Occurrence Analysis Methodology) es una herramienta de análisis de seguridad diseñada para investigar los factores subyacentes que contribuyen a los incidentes aéreos y mejorar la seguridad operacional. El modelo SOAM (Systemic Occurrence Analysis Methodology) se originó en Eurocontrol, la Organización Europea para la Seguridad de la Navegación Aérea. Fue desarrollado como parte de los esfuerzos de Eurocontrol para mejorar la seguridad operacional en la industria de la aviación.

El modelo SOAM se basa en varios enfoques y modelos existentes en el campo de la seguridad operacional. Uno de los principales modelos en los que se basa es el modelo de James Reason (introducido en el apartado anterior) de accidentes organizacionales. James Reason es un reconocido experto en el campo de la seguridad operacional y su modelo se centra en los factores organizacionales y las condiciones latentes que pueden

contribuir a los eventos adversos. El modelo SOAM adopta esta perspectiva sistémica y busca comprender y abordar las deficiencias sistémicas que pueden dar lugar a incidentes y accidentes en la industria de la aviación.

Además del modelo de James Reason, el modelo SOAM también se inspira en otros enfoques y metodologías, como el enfoque de análisis de barreras y el enfoque de análisis de capas de protección. Estos enfoques se centran en identificar y evaluar las barreras y salvaguardias existentes en un sistema para prevenir eventos no deseados.

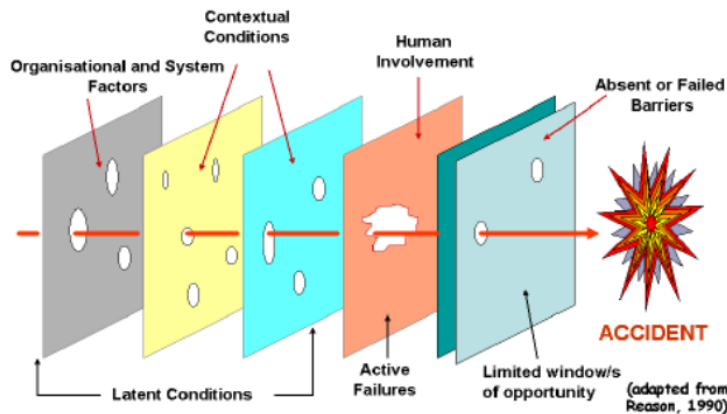


Fig. 3.4. Modelo James Reason [3]

El objetivo principal del modelo SOAM es ir más allá del análisis tradicional centrado en el error humano y explorar las condiciones latentes y los factores organizativos que contribuyen a los incidentes. El enfoque se centra en la identificación de los sistemas, procesos y factores humanos que contribuyen a los incidentes y no en buscar una única causa raíz. SOAM utiliza una combinación de técnicas de análisis cualitativo y cuantitativo para examinar el incidente a través de múltiples niveles de complejidad y proporciona recomendaciones para mejorar la seguridad en cada nivel.

El modelo SOAM utiliza diversas técnicas de análisis, como el análisis de causa-raíz, el análisis de capas de protección, el análisis de secuencia de eventos y el análisis de barreras, para examinar los eventos y comprender sus causas subyacentes. Además, promueve el uso de herramientas de recolección de datos, como entrevistas, cuestionarios y revisión documental, para obtener una visión completa de los eventos y las condiciones que los rodean.

Un análisis SOAM consta de cuatro fases principales: preparación, análisis preliminar, análisis detallado y elaboración del informe final.

Durante la fase de preparación, se identifican los equipos de análisis y se recopila información relevante sobre el incidente. En la fase de análisis preliminar, se lleva a cabo una evaluación preliminar de la situación y se establecen los objetivos y el alcance del análisis.

La fase de análisis detallado es la fase principal del proceso SOAM, donde se lleva

a cabo la investigación a través del análisis sistemático de las condiciones latentes, las condiciones activas y el análisis de contexto.

Por un lado, análisis de las condiciones latentes se centra en identificar los factores organizativos y las deficiencias sistémicas que pueden contribuir a los eventos. Esto implica examinar las políticas, procedimientos, prácticas de gestión, cultura organizativa y otros elementos que pueden influir en la seguridad operacional. El objetivo es comprender cómo estas condiciones latentes pueden interactuar y crear vulnerabilidades en el sistema.

Por otro lado, el análisis de las condiciones activas se enfoca en las acciones humanas y los factores técnicos que contribuyen directamente a los eventos. Esto implica examinar los errores y violaciones cometidos por el personal, así como los problemas relacionados con el equipo, la comunicación y otros aspectos técnicos. El objetivo es comprender cómo estas condiciones activas pueden interactuar con las condiciones latentes y dar lugar a incidentes.

Por último, el análisis del contexto se refiere al entorno en el que se desarrolla la operación aérea, incluyendo aspectos como las regulaciones, el clima, el tráfico aéreo, la disponibilidad de recursos, entre otros. Este análisis permite comprender cómo el contexto puede influir en la aparición de los incidentes y cómo se pueden tomar medidas para mitigar los riesgos asociados.

La fase final del proceso SOAM es la elaboración del informe final, que incluye un resumen de los hallazgos del análisis detallado y las recomendaciones para mejorar la seguridad en cada nivel de complejidad [1].

Tras la realización del análisis SOAM, se distribuye la información obtenida y se relaciona entre sí de acuerdo con la siguiente categorización:

**Fallo de Barrera:** Se refiere a los errores o deficiencias en las barreras de seguridad que están diseñadas para prevenir o mitigar los efectos de un incidente. Estas barreras pueden ser físicas (como sistemas de protección) o no físicas (como políticas y procedimientos). El SOAM identifica los fallos de barrera como uno de los factores contribuyentes a los incidentes y analiza cómo estos fallos permitieron que ocurriera el evento.

**Implicación Humana:** Esta categoría se refiere a los factores humanos que contribuyen a los incidentes. Incluye aspectos como errores de pilotos, controladores de tránsito aéreo u otros miembros del personal, factores de carga de trabajo, capacitación insuficiente, comunicación deficiente, toma de decisiones subóptimas, entre otros. El SOAM reconoce la importancia de comprender las acciones y decisiones humanas dentro del contexto del incidente y analiza cómo los factores humanos pueden haber contribuido al evento [37].

**Condiciones Contextuales:** Esta categoría engloba los factores externos que pueden influir en el desarrollo de un incidente. Incluye aspectos como las condiciones meteorológicas, la disponibilidad y confiabilidad de los sistemas de navegación, la congestión del espacio aéreo, la presión del tiempo, entre otros. El SOAM considera las condiciones



contextuales como factores influyentes en la ocurrencia de un incidente y analiza cómo estas condiciones pueden haber afectado la situación.

**Factores Organizacionales:** Esta categoría se refiere a los aspectos relacionados con la organización y gestión de las entidades involucradas en la aviación, como aerolíneas, proveedores de servicios de navegación aérea, autoridades de aviación civil, entre otros. Incluye aspectos como la cultura de seguridad, los procesos de toma de decisiones, la asignación de responsabilidades, la gestión de recursos humanos y la supervisión. El SOAM reconoce que los factores organizacionales pueden influir en la ocurrencia de incidentes y analiza cómo estos factores pueden haber contribuido a la situación.

**Otros Factores:** Esta categoría engloba cualquier otro factor relevante que no se ajuste a las categorías anteriores. Puede incluir aspectos como fallas técnicas, condiciones operativas específicas, errores de diseño, aspectos regulatorios, entre otros. El SOAM considera la importancia de identificar y analizar estos factores adicionales para comprender plenamente el contexto y las causas del incidente.

Al finalizar el informe, se puede representar con una estructura similar al siguiente ejemplo [1].:

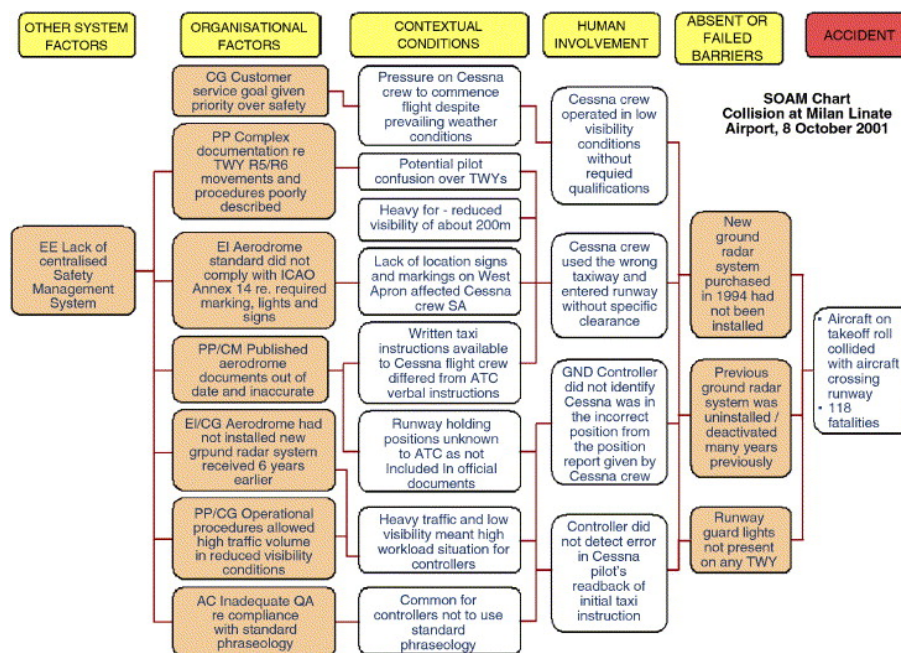


Fig. 3.5. Esquema SOAM [1]

Se puede ver en la imagen anterior que un análisis SOAM tiene como resultado una representación compleja de los fallos de barreras que dieron lugar al incidente o accidente, explicando estas como resultado de la actuación de factores organizacionales y condiciones contextuales (condiciones latentes) e implicación humana (condiciones activas). El modelo SOAM busca analizar y comprender la interacción y relación entre estas categorías en la ocurrencia de incidentes aéreos.

Una de las principales ventajas del modelo SOAM es su enfoque holístico y sistémico,

que permite una comprensión más profunda de los factores que contribuyen a los eventos de seguridad operacional. Al analizar tanto las condiciones latentes como las activas, se pueden identificar las debilidades en el sistema y tomar medidas para corregirlas.

Sin embargo, el modelo SOAM también presenta desafíos y limitaciones. El análisis de las condiciones latentes puede requerir acceso a información confidencial y sensibles, lo que puede plantear problemas de confidencialidad y cooperación entre las partes involucradas. Además, el análisis del contexto puede resultar complejo debido a la multitud de factores que pueden influir en la seguridad operacional.

### 3.4.2. Modelo ADREP y Comparación con el Modelo SOAM

#### Modelo ADREP

El modelo de análisis utilizado en los informes de CEANITA de incidentes aéreos es el modelo ADREP. El modelo ADREP (Aircraft Accident Data and Reporting System) es un sistema desarrollado por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) para la recopilación, análisis y presentación de datos relacionados con accidentes e incidentes de aviación. El objetivo principal del ADREP es estandarizar la información recopilada sobre accidentes y incidentes aéreos para facilitar el intercambio de datos y el análisis comparativo a nivel mundial.

El ADREP proporciona una estructura y un conjunto de códigos para clasificar y codificar la información relacionada con los accidentes e incidentes. Esto incluye información sobre la aeronave involucrada, las circunstancias del evento, los factores contribuyentes, las lesiones y daños resultantes, entre otros aspectos relevantes [39].

El modelo ADREP se utiliza ampliamente en la investigación de accidentes e incidentes aéreos a nivel global. La información recopilada a través del ADREP es utilizada por los organismos de investigación de accidentes, las autoridades de aviación civil y otros actores de la industria para comprender las causas y los factores contribuyentes de los eventos, identificar tendencias y patrones para desarrollar medidas preventivas y correctivas. Además permite compartir datos entre autoridades utilizando una codificación común de sucesos, así como el desarrollo y la aplicación de la herramienta ECCAIRS de EASA [2], [36]. De forma esquematizada, se puede visualizar como un diagrama de árbol donde un incidente o accidente viene provocado por una serie de eventos, los cuales, a su vez, se han dado por una serie de factores descriptivos [39]:

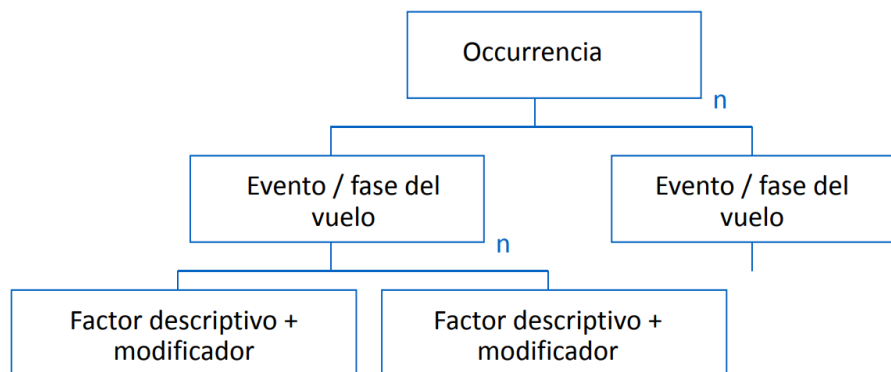


Fig. 3.6. Diagrama de Árbol ADREP [39]

En los informes de CEANITA existen tablas donde se recogen las entradas de información de la siguiente manera:

El modelo ADREP se basa en una serie de categorías y subcategorías que permiten una clasificación detallada de los incidentes y accidentes. Estas categorías incluyen aspectos como el tipo de operación (por ejemplo, vuelo comercial, vuelo de entrenamiento), el

10:42	<b>EVENTO</b>	Desvío de procedimiento ATM Aeronave 1
	<b>FACTOR DESCRIPTIVO</b>	↳ Procedimiento de velocidad Incumplido

Fig. 3.7. Ejemplo ADREP en Informe CEANITA [39]

tipo de aeronave (por ejemplo, avión, helicóptero), el resultado del evento (por ejemplo, fatalidades, daños materiales) y muchos otros aspectos relevantes. Esta categorización se realiza mediante códigos de diferente número de cifras dependiendo de la categoría del dato. Un ejemplo de un código relacionado con un evento es el siguiente [39]:

Event ID	2020202	
<b>Nivel</b>	<b>Código</b>	<b>Significado</b>
Nivel 1	2000000	Aircraft operation general
Nivel 2	2020000	Flight crew/ANS
Nivel 3	2020200	ANS-clearance
Nivel 4	2020202	Clearance-wrong altitude

TABLA 3.1. EJEMPLO DE CÓDIGO DE EVENTO

Por otro lado, un código relacionado con un factor descriptivo tiene el aspecto siguiente:

D. Factor ID	24010101	
<b>Nivel</b>	<b>Código</b>	<b>Significado</b>
Nivel 1	20000000	ATM aircraft management
Nivel 2	24000000	ATM provision of service
Nivel 3	24010000	ATC provision of service
Nivel 4	24010100	ATC air/ground comms
Nivel 5	24010101	ATC phraseology

TABLA 3.2. EJEMPLO DE CÓDIGO DE FACTOR DESCRIPTIVO

Como se puede ver, cada nivel va aportando información más específica. Por lo tanto, es el deber del investigador encontrar el código de nivel más alto que defina la información encontrada para categorizarla mejor y permitir un análisis estadístico más completo.

## Comparación Entre Modelos

El modelo SOAM (Systemic Occurrence Analysis Methodology) de Eurocontrol y el modelo ADREP (Aircraft Accident Data and Reporting System) son dos modelos de análisis de incidentes aéreos ampliamente utilizados en la industria de la aviación. Ambos modelos tienen como objetivo principal identificar las causas subyacentes de los incidentes para prevenir futuros accidentes.

El modelo SOAM se enfoca en analizar el incidente en su contexto más amplio, considerando no solo los aspectos técnicos del incidente, sino también los factores humanos, organizacionales y regulatorios que pueden haber contribuido al mismo. Además, SOAM utiliza un enfoque sistemático para analizar la cadena de eventos que condujeron al incidente, buscando identificar no solo la causa inmediata, sino también las causas subyacentes y las condiciones que permitieron que el incidente ocurriera. [1]

Por otro lado, el modelo ADREP se centra en recopilar y analizar datos específicos del incidente, como la ubicación, el tipo de aeronave, el tipo de incidente, las condiciones meteorológicas, etc. Este modelo se utiliza para clasificar los incidentes según su tipo y severidad, lo que permite identificar tendencias y áreas problemáticas en la seguridad aérea [39].

En cuanto a las ventajas del modelo SOAM, su enfoque sistemático y holístico permite una comprensión más profunda de las causas subyacentes del incidente, lo que puede llevar a soluciones más efectivas y duraderas para prevenir futuros incidentes. Además, SOAM fomenta una cultura de aprendizaje y mejora continua al enfatizar la importancia de compartir información y lecciones aprendidas en toda la industria.

Por otro lado, la ventaja principal del modelo ADREP es su capacidad para recopilar y analizar grandes cantidades de datos de incidentes, lo que permite identificar tendencias y áreas problemáticas en la seguridad aérea de manera eficiente.

En cuanto a las desventajas, el modelo SOAM puede ser más complejo y requiere más recursos para implementarlo en comparación con el modelo ADREP. Además, SOAM puede ser más difícil de aplicar en incidentes que involucran múltiples organizaciones y jurisdicciones. Por otro lado, el modelo ADREP puede mostrar una visión demasiado simple de la relación entre los factores contribuyentes que no permite la localización de los errores latentes subyacentes. Ambos modelos tienen sus ventajas y desventajas, uno de los objetivos de este proyecto es comprobar si pueden ser utilizados de manera complementaria para obtener una comprensión más completa de los incidentes de pérdida de separación aérea y prevenir futuros accidentes.

## 4. METODOLOGÍA

En esta sección se aportará una descripción de los pasos seguidos en la clasificación y estudio de los incidentes, la creación de la base de datos, el análisis de la correlación entre modelos y la identificación de la ruta de fallo.

### 4.1. Selección de Incidentes

El primer paso en la realización del estudio fue seleccionar los incidentes que serían analizados. Para esto es importante entender qué tipo de clasificaciones tienen los informes publicados por la Comisión de Estudio y Análisis de Notificaciones de Incidentes de Tránsito Aéreo (CEANITA). Como se ha introducido en la sección anterior, ésta clasificación se realiza utilizando el esquema de clasificación de severidades, basado a su vez en una matriz de riesgo genérica, ambos incluidos a continuación.

RISK ASSESSMENT MATRIX		CONSIDER THE LIKELIHOOD OF A HAZARDOUS EVENT OCCURRING				
		Very unlikely to happen	Unlikely to happen	Possibly could happen	Likely to happen	Very likely to happen
CONSIDER THE SEVERITY OF INJURY/ILLNESS	Catastrophic (e.g fatal)	Moderate	Moderate	High	Critical	Critical
	Major (e.g Permanent Disability)	Low	Moderate	Moderate	High	Critical
	Moderate (e.g Hospitalisation/Short or Long Term Disability)	Low	Moderate	Moderate	Moderate	High
	Minor (e.g First Aid)	Very Low	Low	Moderate	Moderate	Moderate
	Superficial (e.g No Treatment Required)	Very Low	Very Low	Low	Low	Moderate

Fig. 4.1. Matriz de Riesgo Genérica

La clasificación de incidentes aéreos según la ESARR 2 Guidance Document EAM2/GUI1 se basa en dos aspectos: la severidad del incidente y la probabilidad de que ocurra. Estas clasificaciones ayudan a evaluar la importancia y el nivel de riesgo asociado con cada incidente.

<b>Probabilidad</b> <b>Severidad</b>	Muy Frecuente	Frecuente	Ocasional	Raro	Ext. Raro
Incidente Serio	A1	A2	A3	A4	A5
Incidente Mayor	B1	B2	B3	B4	B5
Incidente Significativo	C1	C2	C3	C4	C5
No Determinado	D1	D2	D3	D4	D5
Sin Efecto Imto. en la Seguridad	E1	E2	E3	E4	E5

TABLA 4.1. ESQUEMA DE CLASIFICACIÓN DE SEVERIDADES

En cuanto a la clasificación por severidades, se utilizan las siguientes categorías:

**Incidente serio (A):** Se refiere a un incidente que tiene el potencial de causar una lesión grave o la pérdida de una aeronave, como referencia, se entiende que la diferencia entre un incidente serio y un accidente es solamente el resultado. Puede implicar un alto nivel de riesgo y requiere una atención inmediata para prevenir futuros accidentes.

**Incidente mayor (B):** Corresponde a un incidente que tiene el potencial de causar lesiones leves o moderadas o daños significativos a una aeronave. Aunque no llega al nivel de un incidente serio, aún representa un riesgo significativo y requiere una investigación y análisis detallados. Son situaciones en las que no se han respetado los márgenes de seguridad, no siendo esto resultado de una instrucción ATC.

**Incidente significativo (C):** Se refiere a un incidente que no cumple con los criterios de los incidentes serios o mayores, pero aún tiene un impacto significativo en la seguridad operativa. Estos incidentes pueden revelar deficiencias en los procedimientos, sistemas o factores humanos que deben abordarse para evitar futuros eventos más graves. Son situaciones en las que el riesgo se gestionó dentro de los márgenes de seguridad.

**No determinado (D):** Esta clasificación se utiliza cuando no se puede determinar la severidad del incidente debido a la falta de información o datos insuficientes. Puede requerir una investigación más exhaustiva para evaluar adecuadamente el impacto y el riesgo asociado.

**Sin efecto inmediato en la seguridad (E):** Se refiere a un incidente que no tiene un impacto inmediato en la seguridad de las operaciones aéreas. Puede involucrar situaciones de bajo riesgo o eventos benignos que no requieren una acción inmediata, pero aún pueden ser importantes para el análisis y la mejora continua de la seguridad.

En cuanto a la clasificación por probabilidades o frecuencia, se utilizan las siguientes categorías:

**Extremadamente raro:** Se refiere a un incidente que ocurre en circunstancias excepcionales que no se ha producido en la totalidad de la vida útil del sistema.

**Raro:** Indica un incidente que ocurre en condiciones inusuales, pero que aún puede tener alguna posibilidad de repetirse en situaciones similares ya que se tienen registros

(aunque extraordinariamente escasos) de incidentes similares.

**Ocasional:** Corresponde a un incidente que puede ocurrir en ciertas condiciones o circunstancias específicas, pero no de manera frecuente. Se tienen registros de incidentes similares en un mismo lugar.

**Frecuente:** Se refiere a un incidente que ocurre con regularidad en las operaciones aéreas y tiene una probabilidad significativa de repetirse.

**Muy frecuente:** Indica un incidente que ocurre con una alta frecuencia en las operaciones aéreas, siendo una ocurrencia común y repetidas veces en un mismo lugar.

Estas clasificaciones permiten evaluar y comparar la gravedad y la frecuencia de los incidentes aéreos, lo que facilita la priorización de acciones de mejora y la asignación de recursos para prevenir futuros eventos.

Para realizar este estudio se han seleccionado los informes publicados por CEANITA entre 2012 y 2018 de severidad (A). Además, ya que en los informes no se especifica lo frecuente que es el tipo de incidente que ha ocurrido, este estudio se centrará en una de las categorías más comunes, concretamente, aquellos que detallen pérdidas de separación de aeronaves

Al enfocarse en los incidentes más graves, se busca comprender a fondo los factores subyacentes que contribuyeron a su ocurrencia. Al identificar los rasgos comunes entre estos incidentes, como patrones de comportamiento, deficiencias en los procedimientos o problemas en los sistemas, se puede identificar áreas críticas que requieren atención inmediata. Esto permite implementar medidas correctivas y preventivas específicas para abordar los problemas identificados y evitar la repetición de incidentes similares en el futuro.

El estudio de los informes de incidentes de severidad más grave también ayuda a enfocar los recursos limitados de manera efectiva. Al centrarse en los incidentes que representan un mayor riesgo, se pueden asignar los recursos adecuados para abordar las áreas de mejora más críticas. Esto garantiza un uso eficiente de los recursos y una mayor efectividad en el estudio sobre las posibles mejoras de la seguridad operacional.

Además, al analizar los incidentes de la misma categoría, como la pérdida de separación en vuelo, se pueden identificar patrones o tendencias específicas relacionadas con este tipo de incidente en particular. Esto proporciona información valiosa para desarrollar medidas de prevención y mitigación específicas que aborden los desafíos y riesgos asociados con la pérdida de separación en vuelo.

Enfocando el estudio en los informes de incidentes aeronáuticos de severidad más grave (categoría A) y de la misma categoría, como la pérdida de separación en vuelo, permite identificar los rasgos comunes y los fallos latentes en las áreas críticas que requieren atención inmediata.



## 4.2. Proceso de Análisis

Esta sección del informe cubre el análisis de incidentes de severidad A de pérdida de separación en vuelo, con el objetivo de comprender las causas subyacentes y las deficiencias sistémicas que pueden poner en peligro la seguridad operacional en la aviación. En este apartado, se presenta el proceso de análisis seguido para examinar los informes de incidentes ocurridos entre los años 2012 y 2018, aplicando dos metodologías reconocidas: la metodología SOAM (Systemic Occurrence Analysis Methodology) y la metodología ADREP (Aircraft Data Reporting and Exchange Program).

El objetivo de este análisis ha sido identificar los factores comunes y las rutas de fallo más habituales en los incidentes de pérdida de separación en vuelo, a fin de mejorar la seguridad operacional y tomar medidas correctivas para prevenir la recurrencia de estos incidentes en el futuro.

En primer lugar y como se ha definido en la sección anterior, se ha llevado a cabo la recopilación de los informes de incidentes de severidad A de pérdida de separación en vuelo, obtenidos de publicaciones de CEANITA. Al no tener acceso a las fuentes originales de información (los participantes y personas de interés involucradas en el incidente), solamente se ha podido extraer información de estos informes, además de fuentes de información externas para matices concretos. Estos informes proporcionaron una visión detallada de los incidentes ocurridos durante el período de estudio y han servido como base para el análisis subsiguiente.

Posteriormente, se ha aplicado tanto la metodología SOAM como la metodología ADREP para analizar los informes recopilados. La metodología SOAM permite examinar los incidentes desde una perspectiva sistémica, considerando los factores de barrera, la implicación humana, las condiciones contextuales, los factores organizacionales y otros factores relevantes que pudieran haber contribuido a la pérdida de separación en vuelo. Por otro lado, la metodología ADREP debe facilitar la identificación de los datos clave relacionados con los incidentes y proporcionó un marco estructurado para el análisis. El objetivo detrás de aplicar ambos modelos es comprobar la compatibilidad de ambos y comprobar la cantidad de información complementaria que son capaces de aportar.

Durante el proceso de análisis, se ha creado una base de datos específica para recoger la información obtenida de los informes de incidentes. Esta base de datos ha permitido la organización y clasificación sistemática de los datos, facilitando la identificación de patrones y tendencias en los incidentes analizados.

Tras el análisis, se ha examinado detalladamente la información clasificada en la base de datos para identificar las rutas de fallo más habituales y comunes entre los incidentes de pérdida de separación en vuelo. Estas rutas de fallo representan los puntos críticos donde se encontraron deficiencias y vulnerabilidades en los sistemas y procesos operativos, y proporcionaron información valiosa para tomar medidas correctivas y mejorar la seguridad operacional.

En los apartados siguientes se explicará con mayor detalle cada uno de estos pasos definidos.

#### 4.2.1. Análisis SOAM de Informe

Como se ha introducido en las secciones anteriores, el principal objetivo de este proyecto ha sido el análisis de los incidentes aéreos de pérdida de separación en vuelo de Severidad (A) aplicando el modelo SOAM. Para esto, se han seguido las directrices definidas en el apartado de “Definición del modelo SOAM y sus Objetivos” siguiendo los siguientes pasos:

##### Paso 1: Recopilación de Datos: Modelo SHELL

El primer paso en toda investigación es la recopilación de información con el objetivo de definirla y detallar su intervención en el incidente. En el caso del modelo SOAM, este paso está basado en el modelo SHELL. El modelo SHELL es una herramienta ampliamente utilizada en la industria aeronáutica para analizar los factores humanos y la interacción entre los elementos del sistema. El modelo SHELL se compone de cinco elementos clave: Software (S), Hardware (H), Environment (E), Liveware (L) y la interacción entre estos.

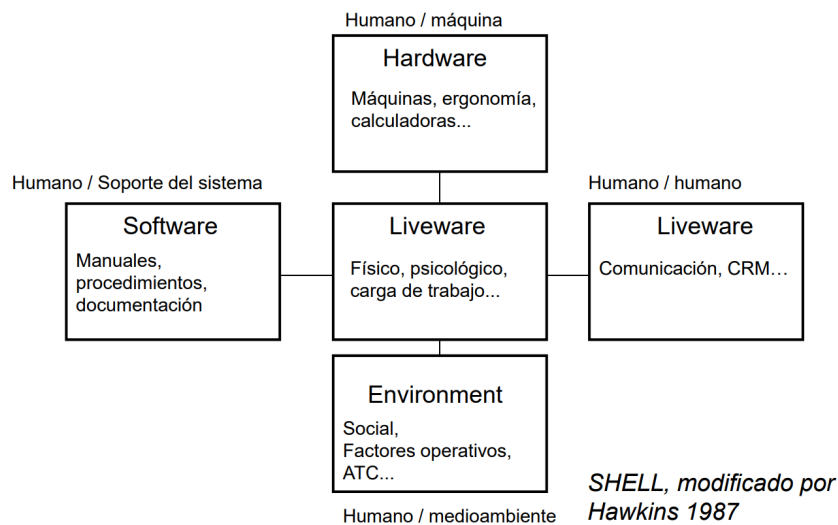


Fig. 4.2. Modelo SHELL [39]

- El elemento Liveware se refiere a los factores humanos involucrados en el sistema. Esto incluye aspectos físicos, fisiológicos, psicológicos y psicosociales de las personas que operan en el entorno aeronáutico. Los factores físicos se refieren a las capacidades físicas de los individuos, como la visión, la audición y la destreza manual. Los factores fisiológicos se centran en las capacidades y limitaciones del cuerpo humano, como la fatiga, el estrés y la salud general. Los factores psicológicos consideran los procesos mentales, las habilidades cognitivas, la toma de

decisiones y la carga de trabajo mental. Los factores psicosociales se refieren a las interacciones sociales, la comunicación y la colaboración entre las personas involucradas en la operación aeronáutica.

- El elemento Hardware se refiere a los componentes físicos del sistema, como los aviones, los equipos de navegación, los instrumentos y las herramientas utilizadas en la operación aérea. Estos componentes tienen un impacto directo en la capacidad de los operadores para llevar a cabo sus tareas de manera efectiva y segura.
- El elemento Software se refiere a los programas informáticos y las aplicaciones utilizadas en el contexto aeronáutico. Esto incluye sistemas de gestión del tráfico aéreo, sistemas de comunicación, sistemas de navegación y otros programas relacionados. El software desempeña un papel crucial en la operación aérea, ya que ayuda a automatizar procesos, proporciona información en tiempo real y facilita la toma de decisiones.
- El elemento Environment se refiere al entorno físico y situacional en el que se lleva a cabo la operación aérea. Esto incluye factores como el clima, las condiciones de visibilidad, la infraestructura aeroportuaria y las limitaciones geográficas. El entorno puede presentar desafíos y riesgos que deben ser considerados en el diseño y la implementación de procedimientos de seguridad.

Finalmente, la interacción se refiere a la forma en que los elementos del sistema interactúan entre sí y cómo se comunican las personas involucradas en la operación aérea. Este modelo reconoce el factor humano como central en un sistema socio-técnico, por lo que la interacción será Software-Liveware (S-L), Hardware-Liveware (H-L), Environment-Liveware (E-L) o Liveware-Liveware (L-L).

En el contexto del modelo SOAM, la recopilación de datos considerando el modelo SHELL implica analizar y recoger información sobre cada uno de los elementos mencionados. Esto implica examinar los informes de incidentes aéreos en busca de datos relacionados con los factores humanos (liveware), como errores de los operadores, comunicación deficiente, fatiga, estrés, entre otros. Además, se deben recopilar datos sobre el hardware utilizado en la operación, como aviones, equipos de navegación y sistemas de comunicación. También es importante considerar el software utilizado, como los sistemas de gestión del tráfico aéreo y los programas informáticos relacionados. Además, se debe analizar el entorno en el que se produjo el incidente, considerando factores climáticos, condiciones de visibilidad y limitaciones geográficas. Por último, se deben examinar las interacciones entre los elementos del sistema, evaluando la comunicación y la colaboración entre las personas involucradas.

La recopilación de datos es un proceso recursivo que tiene como objetivo la eliminación de preguntas sin respuesta y el establecimiento de conclusiones lógicas, los pasos a repetir de manera cíclica para cumplir este fin son los siguientes:

- Recopilación de Datos
- Análisis Preliminar
- Identificación de lagunas que pueden cubrirse con más recopilación de datos
- Análisis sistemático
- Eliminación de preguntas sin respuesta y establecimiento de conclusiones lógicas

El proceso de identificación de componentes y sucesos que han contribuido a un incidente utilizando la metodología SOAM es inverso. Esto significa que desde el incidente, lo primero que se buscará son los fallos o ausencias de barreras preventivas, después, se analizan la implicación humana y las condiciones contextuales que permitieron el fallo de las barreras. Por último, se investigan los factores organizacionales que influenciaron los componentes contextuales.

## **Paso 2: Análisis de Barreras**

En un análisis SOAM de un incidente aéreo, el segundo paso consiste en identificar y evaluar los fallos o ausencias de barreras en el sistema. Las barreras son elementos cruciales que tienen como objetivo prevenir la ocurrencia de eventos no deseados o reducir su impacto en caso de que ocurran. Se definen como obstáculos que impiden que se realice una acción o que un evento tenga lugar, así como también como mecanismos que previenen o reducen las consecuencias negativas, como la liberación no controlada de materia y energía.

Según el modelo de James Reason, las defensas actúan como la protección final contra sucesos que afectan la seguridad, contrarrestando los efectos de errores o infracciones, o mitigando sus consecuencias. Estas defensas se consideran barreras que deberían estar presentes y funcionar correctamente en el sistema. Sin embargo, las capas defensivas del modelo Reason pueden resultar inadecuadas por dos razones principales: no funcionan como se esperaba para evitar la ocurrencia de un evento o las defensas que razonablemente podrían haber estado presentes no fueron creadas o instaladas por la organización responsable.

El modelo SOAM (Systemic Occurrence Analysis Methodology) de investigación de incidentes aéreos reconoce seis tipos de barreras que desempeñan un papel crucial en la prevención, resolución y mitigación de eventos no deseados. Deben entenderse como una línea sucesiva de defensa desde la primera hasta la última, estas son:

- **Conocimiento (Prevención):** Este tipo de barreras juegan un papel importante en la prevención de un suceso inusual o incidente, son aquellas que aseguran el conocimiento del estado del sistema, riesgos y peligros, reglas, procedimientos y controles que aplican a la tarea. Algunos ejemplos pueden ser: Reglas, guías, supervisión, training, comunicación en los relevos, safety briefing, etc.

- **Barreras de Restricción (Prevención):** Estas barreras se refieren a la limitación o restricción de acciones o eventos que podrían dar lugar a incidentes. Ejemplos de barreras de restricción incluyen ordenes de trabajo, instrucciones, procedimientos, el uso de fraseología estándar y procedimientos de control de tráfico aéreo para mantener separación entre aeronaves. Estas barreras ayudan a prevenir la ocurrencia de incidentes al evitar situaciones de riesgo o controlar el acceso a áreas críticas.
- **Barreras de Detección (Prevención y resolución):** Estas barreras se utilizan para detectar la presencia de condiciones anormales o eventos inusuales y permitir la intervención temprana. Ejemplos de barreras de detección incluyen sistemas de monitoreo y alarmas, inspecciones regulares de equipos, procedimientos de comunicación efectivos y observación visual. Estas barreras ayudan a prevenir y resolver incidentes al proporcionar alertas y advertencias oportunas sobre situaciones que requieren atención y acción.
- **Barreras de Control y Recuperación (Resolución):** Estas barreras están diseñadas para la Recuperación de una condición no-normal y restauración del sistema a un estado de seguridad con el mínimo daño o pérdida. Una vez que se ha detectado la anomalía, la labor de control y recuperación recae principalmente sobre el piloto y/o el controlador, aunque otros ejemplos de barreras de control y recuperación incluyen procedimientos de emergencia, sistemas de control de vuelo automatizados y sistemas de comunicación de emergencia. Estas barreras ayudan a resolver incidentes al proporcionar acciones y recursos para restablecer la seguridad y controlar la situación.
- **Barreras de Protección y Confinamiento (Mitigación):** Estas barreras se centran en mitigar los efectos de un incidente y prevenir su propagación o impacto en áreas adyacentes. Ejemplos de barreras de protección y confinamiento incluyen la protección de las personas contra lesiones y sistemas de contención de sustancias peligrosas, barreras físicas para limitar la propagación de incendios, sistemas de ventilación para controlar la dispersión de gases tóxicos, y sistemas de protección personal. Estas barreras ayudan a minimizar los daños y a proteger a las personas y el entorno en caso de incidentes. Ejemplos de barreras de este tipo pueden ser: Paredes, puertas, filtros, contenedores cinturones de seguridad, arneses, equipo de protección personal, etc.
- **Barreras de Escape y Rescate (Mitigación):** Estas barreras se refieren a las medidas y recursos necesarios para permitir la Habilitación de las posibles víctimas para escapar a riesgos fuera de control, tratamiento de lesiones y restauración del medio ambiente. Ejemplos de barreras de escape y rescate incluyen Servicios de emergencia, atención médica y primeros auxilios. Estas barreras ayudan a mitigar los efectos de los incidentes al facilitar la evacuación rápida y segura de las personas involucradas y proporcionar los medios necesarios para su rescate.

Estos seis tipos de barreras reconocidos por el modelo SOAM constituyen la línea principal de defensa, abarcan diferentes aspectos del sistema aeronáutico y juegan un papel fundamental en la prevención, resolución y mitigación de los efectos de incidentes y accidentes aéreos.

### **Paso 3: Implicación Humana**

El siguiente paso en la investigación de un incidente aéreo utilizando la metodología SOAM es el análisis de la implicación humana, es decir, examinar las acciones o inacciones que precedieron al incidente. El objetivo de este paso es comprender el papel desempeñado por las personas en el desarrollo del evento, centrándose en sus acciones y decisiones sin buscar explicaciones o juicios de valor sobre por qué actuaron de cierta manera.

Para analizar la implicación humana en una incidencia, el modelo SOAM puede recurrir al Decision Ladder model de Rasmussen (1982). Este modelo proporciona un marco útil para comprender cómo las personas toman decisiones en situaciones complejas. Las etapas clave del modelo de Rasmussen son las siguientes:

- **Observación:** En esta etapa, las personas perciben y recopilan información relevante sobre la situación. Se centran en la identificación de señales y pistas que les ayuden a comprender el contexto y evaluar los riesgos.
- **Interpretación:** En esta etapa, las personas analizan la información recopilada y la interpretan para comprender la situación. Esto implica dar sentido a los datos disponibles, identificar patrones y evaluar la relevancia de la información en relación con sus objetivos y tareas.
- **Elección de objetivo:** En esta etapa, las personas establecen metas y objetivos en función de su comprensión de la situación y de los requisitos de la tarea. Seleccionan el objetivo al que desean llegar o el resultado que desean lograr.
- **Elección de plan de acción:** En esta etapa, las personas seleccionan el plan de acción específico que seguirán para implementar su estrategia. Deciden qué acciones tomar y cómo llevarlas a cabo, teniendo en cuenta los recursos disponibles y las limitaciones del entorno.
- **Ejecución de plan de acción:** En esta etapa final, las personas llevan a cabo las acciones y pasos planificados para implementar su estrategia y lograr su objetivo. Esto implica poner en práctica las decisiones tomadas y llevar a cabo las tareas necesarias.

Al analizar la implicación humana en un incidente aéreo, se examinan las acciones e inacciones de las personas en cada una de estas etapas de decisión. El objetivo es identifi-

car los pasos específicos que se tomaron y cómo contribuyeron a la ocurrencia del evento, sin enfocarse aún en las razones subyacentes.

Al comprender la implicación humana en un incidente aéreo a través del análisis de las etapas de decisión del modelo de Rasmussen, se obtiene una visión más clara de cómo las acciones individuales se entrelazan con el sistema más amplio y pueden influir en el desarrollo de fallos de barreras que derivan en incidentes o accidentes.

#### **Paso 4: Condiciones Contextuales**

Una vez se ha identificado la implicación humana, el paso siguiente en una investigación SOAM es el estudio de las condiciones contextuales, las cuales describen las circunstancias que existían en el momento de la ocurrencia del incidente aéreo. Estas condiciones están relacionadas tanto con lo que James Reason definió como “precursors of unsafe acts” (condiciones previas que pueden dar lugar a actos inseguros), como con el concepto de condiciones latentes que incluyen el entorno, factores de situación, condiciones o factores que modelan el rendimiento.

Las condiciones contextuales son elementos importantes a considerar, ya que ayudan a explicar por qué una persona actuó de la manera en que lo hizo en un momento específico. Estas condiciones se refieren al entorno físico, social y psicológico en el que tuvo lugar el incidente. El objetivo es identificar los factores que influyeron en las acciones de las personas y comprender cómo las condiciones contextuales pueden haber contribuido al desarrollo del incidente.

Para investigar las condiciones contextuales, se formulan preguntas específicas que ayudan a obtener información relevante. Algunas de estas preguntas son:

- ¿Cuáles fueron las condiciones en el lugar y en el momento de la ocurrencia del incidente que ayudan a explicar por qué una persona actuó como lo hizo?
- ¿Describe lo identificado un aspecto del lugar de trabajo, clima local de la organización, actitudes, personalidad, limitaciones del rendimiento, estado emocional o psicológico de una persona que ayude a explicar sus acciones?

Estas preguntas permiten explorar diferentes aspectos de las condiciones contextuales y proporcionan una base sólida para analizar y comprender los factores que pueden haber influido en el comportamiento humano durante el incidente.

En el contexto de la investigación SOAM, se pueden identificar cinco categorías principales de condiciones contextuales:

- **Condiciones del lugar de trabajo:** Se refiere a los aspectos físicos y ambientales del entorno laboral, como el diseño de la cabina, los equipos utilizados, la iluminación, el ruido, entre otros.

- **Clima de la organización:** Se relaciona con las normas, valores y prácticas dentro de la organización que pueden influir en el comportamiento de las personas. Esto incluye la cultura de seguridad, la comunicación efectiva y la gestión de recursos humanos.
- **Actitudes y personalidad:** Se refiere a las características individuales, creencias, actitudes y motivaciones que pueden influir en las decisiones y acciones de las personas. Esto incluye la disposición para tomar riesgos, la percepción del trabajo y la seguridad, y la capacidad de trabajar en equipo.
- **Limitaciones humanas del rendimiento:** Se refiere a las limitaciones inherentes a la capacidad humana, como la fatiga, la carga de trabajo excesiva, la falta de entrenamiento adecuado y las limitaciones físicas o cognitivas.
- **Factores psicológicos y emocionales:** Se refiere a los estados emocionales, el estrés, la presión o cualquier otro factor psicológico que pueda influir en el comportamiento humano y en la toma de decisiones.

Cada una de estas categorías de condiciones contextuales puede tener factores de error, factores comunes y factores de violación asociados. Estas categorías son indicadores de la severidad de la condición contextual encontrada. Algunos ejemplos se encuentran en las siguientes tablas:

<b>Condiciones del Lugar de Trabajo</b>		
<b>Factores de Error</b>	<b>Factores Comunes</b>	<b>Factores de Violación</b>
Pobre correspondencia entre las instrucciones de trabajo y su ejecución	Herramientas y equipos inadecuados	Procedimientos protegen el sistema > individuo
Mala relación señal-ruido	Presiones de tiempo	Tarea permite atajos fáciles
Falta de entendimiento diseñador-usuario	Malas condiciones de trabajo	
Pobre interfaz hombre-sistema	Supervisión inadecuada	
Malas comunicaciones	Procedimientos e instrucciones pobres	
Malas organización de turnos y horas extraordinarias	Mal reparto de tareas	
Ambiente de trabajo hostil	Mala relación supervisor / trabajador	

TABLA 4.2. CONDICIONES DEL LUGAR DE TRABAJO



<b>Clima Organizacional</b>		
<b>Factores de Error</b>	<b>Factores Comunes</b>	<b>Factores de Violación</b>
Complacencia	Poca Autonomía	Tolerancia de las violaciones Cultura de la culpa Cumplimiento queda sin recompensa Cultura machista Sanciones desleales Bajo estatus de operación

TABLA 4.3. CLIMA ORGANIZACIONAL

<b>Actitudes y Factores Personales</b>		
<b>Factores de Error</b>	<b>Factores Comunes</b>	<b>Factores de Violación</b>
Baja Autoestima	Falta de juicio o criterio Ilusión de control Poco esfuerzo Exceso de confianza	Insatisfacción laboral Impotencia aprendida Objetivo de alto riesgo Percepción errónea de los riesgos

TABLA 4.4. ACTITUDES Y FACTORES PERSONALES

<b>Limitaciones del Rendimiento Humano</b>		
<b>Factores de Error</b>	<b>Factores Comunes</b>	<b>Factores de Violación</b>
Fallos de memoria Sesgo de confirmación Percepciones falsas Conocimiento inexacto o incompleto Juego de Percepción	Habilidad inadecuada Capacidad insuficiente Capacitación inadecuada Falta de familiaridad con la tarea	

TABLA 4.5. LIMITACIONES DEL RENDIMIENTO HUMANO

<b>Factores Fisiológicos y Emocionales</b>		
<b>Factores de Error</b>	<b>Factores Comunes</b>	<b>Factores de Violación</b>
Patrones de sueño perturbado Programas motores fuertes: el sesgo de frecuencia Estrés y la fatiga Problemas internos	La ansiedad de desempeño Estado de excitación : la monotonía y el aburrimiento, estado emocional	Mal humor

TABLA 4.6. FACTORES FISIOLÓGICOS Y EMOCIONALES

### **Paso 5: Factores Organizacionales y Otros Factores**

El siguiente paso en una investigación SOAM de un incidente aeronáutico es la búsqueda de factores organizacionales, los cuales describen las circunstancias que existían antes de la incidencia y que produjeron o permitieron la existencia de las condiciones contextuales que, a su vez, influenciaron las acciones o inacciones del personal involucrado. Estos factores organizacionales son fundamentales para comprender el contexto más amplio en el que se produjo el incidente y pueden desempeñar un papel crucial en su desarrollo.

A continuación, se presentan los tipos de factores organizacionales que se investigan en el marco del modelo SOAM:

- **Entrenamiento / formación:** Se refiere a la capacitación y formación del personal, incluyendo la calidad, adecuación y actualización de los programas de entrenamiento, así como la supervisión y evaluación del desempeño del personal.
- **Gestión del personal:** Se refiere a la selección, asignación, coordinación y supervisión del personal, incluyendo aspectos como la carga de trabajo, la gestión del tiempo, la asignación de responsabilidades y la adecuación de los recursos humanos disponibles.
- **Responsabilidad:** Se refiere a la claridad de las responsabilidades y las expectativas del personal en relación con la seguridad, así como a los mecanismos de rendición de cuentas y las consecuencias de los errores o incumplimientos.
- **Comunicación:** Se refiere a la efectividad de la comunicación dentro de la organización, incluyendo la transmisión de información relevante, la claridad de los mensajes, la retroalimentación y la comunicación en situaciones de emergencia.
- **Cultura de la organización:** Se refiere a los valores, normas, actitudes y creencias compartidas dentro de la organización en relación con la seguridad, incluyendo la importancia otorgada a la seguridad, la apertura para informar sobre incidentes y la disposición para aprender de ellos.

- **Objetivos en conflicto:** Se refiere a situaciones en las que existen objetivos o presiones contradictorias que pueden influir en las decisiones y acciones del personal, como la presión por cumplir plazos, mantener la eficiencia operativa o alcanzar metas comerciales.
- **Políticas y procedimientos:** Se refiere a las políticas y procedimientos establecidos dentro de la organización para abordar aspectos relacionados con la seguridad, incluyendo su claridad, aplicabilidad y actualización.
- **Gestión del riesgo:** Se refiere a la forma en que se identifican, evalúan y gestionan los riesgos dentro de la organización, incluyendo los procesos de análisis de riesgos, la implementación de medidas de mitigación y la retroalimentación para mejorar la seguridad.
- **Gestión del mantenimiento:** Se refiere a los procesos y prácticas relacionados con el mantenimiento de las aeronaves y equipos, incluyendo la planificación, ejecución y supervisión de las actividades de mantenimiento.
- **Equipo e infraestructura:** Se refiere a la calidad, adecuación y disponibilidad de los equipos, herramientas y sistemas utilizados en la operación aérea, así como a la infraestructura necesaria para su correcto funcionamiento.
- **Gestión del cambio:** Se refiere a la forma en que se gestionan los cambios en los procedimientos, equipos, personal o estructura organizativa, incluyendo la identificación de los riesgos asociados y las medidas para asegurar una transición segura.
- **Entorno externo:** Se refiere a los factores externos a la organización que pueden influir en la seguridad, como las regulaciones, las condiciones meteorológicas, la congestión del espacio aéreo, entre otros.

Es importante destacar que encontrar indicios de estos factores organizacionales en los informes publicados tras las investigaciones de incidentes aéreos puede ser un desafío, ya que estos informes no siempre han sido elaborados siguiendo la metodología SOAM. En muchos casos, se centran en describir los eventos y factores descriptivos directos del incidente, sin profundizar en el análisis de los factores organizacionales subyacentes. Por lo tanto, es necesario realizar un análisis adicional e integrar información de diversas fuentes para comprender plenamente el papel de los factores organizacionales en el incidente.

Por último, “Otros Factores” es una categoría miscelánea que hace referencia a cualquier factor que haya contribuido al incidente que no se alinee con las categorías descritas anteriormente. Esta categorización sirve como prueba de que el modelo SOAM aún permite iteraciones y desarrollo para mejorar su capacidad de clasificación de información.

#### 4.2.2. Creación de la Base de Datos SOAM

Una vez se ha realizado el estudio de un informe de incidente de pérdida de separación y se han identificado todos los factores empezando por los fallos de barreras hasta las condiciones contextuales y factores organizacionales (si estos se encuentran), el siguiente paso es crear una base de datos que recopile toda la información encontrada y permita su estudio de manera íntegra y eficiente.

El software utilizado para la creación de esta base de datos ha sido Microsoft Excel.

Debido a la gran cantidad de datos que se deben manejar, se han definido una serie de principios que deben estar integrados en el formato de la base de datos para asegurar su validez y utilidad [41], [42]:

- **Principio de entidad:** Cada tabla en la base de datos debe representar una entidad o concepto único, como una persona, un producto o una transacción. Cada entidad se representa mediante una tabla con filas (registros) y columnas (atributos).
- **Principio de atributos únicos:** Cada columna de una tabla debe contener valores únicos para cada registro. Esto se logra mediante la definición de una clave primaria, que es un atributo o una combinación de atributos que identifica de forma única cada registro en la tabla.
- **Principio de integridad referencial:** Se refiere a mantener la consistencia de los datos relacionados entre diferentes tablas. Esto se logra estableciendo relaciones entre tablas utilizando claves primarias y claves externas (o claves foráneas) para garantizar que los datos relacionados sean precisos y coherentes.
- **Principio de normalización:** Es el proceso de organizar los datos en tablas de manera eficiente y sin redundancias. La normalización se basa en una serie de reglas que ayudan a eliminar la duplicación de datos y a garantizar la integridad de los datos.
- **Principio de atomicidad:** Las operaciones en una base de datos deben ser atómicas, lo que significa que se realizan como una sola unidad indivisible. Si una operación falla en cualquier punto, se deshacen todos los cambios realizados hasta ese momento, asegurando así la consistencia de los datos.
- **Principio de consistencia:** Los datos en la base de datos deben estar sujetos a reglas y restricciones para mantener su integridad y coherencia. Esto se logra mediante la aplicación de restricciones de integridad, como reglas de validación y verificaciones de datos.
- **Principio de independencia:** Los datos deben estar separados de las aplicaciones que los utilizan. Esto significa que los cambios en la estructura de la base de datos no deben afectar a las aplicaciones existentes. La independencia se logra utilizando

una capa de abstracción, como vistas o procedimientos almacenados, que permite acceder a los datos de manera transparente.

Estos principios son fundamentales para diseñar una base de datos eficiente, segura y fácil de mantener. Siguiendo estos principios, se puede lograr un modelo de datos coherente y bien estructurado que satisfaga las necesidades de almacenamiento y recuperación de información de manera eficiente.

Para lograr reflejar toda la información extraída mediante un proceso de investigación SOAM, es necesario que cada entrada contenga:

- **Categoría de dato:** Fallo de Barrera, Implicación Humana, Condición Contextual o Factor Organizacional.
- **Sub-categorías:** Incluyen las definiciones incluidas en el apartado (4.2.1.) “Análisis SOAM de Informe”.
- **Descripción:** Contextualización del dato dentro del informe correspondiente.
- **Identificación:** Un código único que recopila la información del año del incidente, el tipo de dato y un número identificador para asegurar que cada código es único.
- **Relación:** Una entrada que recopila las relaciones SOAM entre datos. A qué otros datos ha influenciado este, y por cuáles otros datos ha sido influenciado.

Una vez identificados y revisados todos los datos SOAM, se ha realizado un estudio estadístico con el objetivo de facilitar la visualización de las áreas que requieren atención y encontrar los errores latentes.

### **Identificación de Ruta de Fallo**

Una vez realizados los estudios estadísticos y analíticos previos, el último paso para visualizar y contextualizar las tendencias de los incidentes aéreos de pérdida de separación en vuelo de severidad A ha sido la identificación de las rutas de fallo más comunes. Estas rutas de fallo son posibles de identificar gracias a que el modelo SOAM es lineal, es decir, hay una relación directa entre sus componentes. Comenzando desde los fallos de barreras con mayor impacto en la ocurrencia de este tipo de incidentes, se han estudiado las condiciones activas (implicación humana) y pasivas (condiciones contextuales) con mayor impacto en estos fallos.

El objetivo es identificar estas cadenas de error más frecuentes para realizar un análisis de posibles defectos latentes y subyacentes que puedan ser remediados para reducir el número de ocurrencias de este tipo en el futuro.

Estos estudios estadísticos se encuentran en el siguiente apartado de este ensayo “Análisis de Resultados”.

### 4.2.3. Correlación SOAM-ADREP

Una vez finalizado el análisis individual de cada informe de pérdida de separación en vuelo de severidad A utilizando la metodología SOAM, se ha dado paso a un enfoque complementario basado en el modelo ADREP, el cual es ampliamente utilizado en la actualidad para el análisis de incidentes aéreos. El objetivo principal de esta fase del estudio es evaluar la compatibilidad entre ambos modelos y determinar qué tipo de información adicional puede ser proporcionada por el modelo ADREP.

Para esto, se han seguido los siguientes pasos:

1. Creación de base de datos ADREP: Se han obtenido y organizado más de 2000 códigos ADREP (incluyendo Eventos y Factores Descriptivos) en una base de datos complementaria que sirva de referencia para el estudio utilizando esta terminología.
2. Una vez que se ha establecido la base de datos ADREP, se ha llevado a cabo un estudio exhaustivo de su taxonomía y estructura. Esto implica comprender la forma en que el modelo ADREP organiza los datos y los diferentes niveles de información que se pueden obtener a través de su estructura jerárquica. Cada código ADREP se encuentra estructurado en niveles, y cada nivel proporciona información específica y detallada sobre el incidente en cuestión.
3. El siguiente paso ha sido la traducción de los datos obtenidos previamente a través del análisis SOAM al formato y terminología utilizados por el modelo ADREP. Esto implica mapear los datos recopilados en el análisis SOAM a los códigos y categorías correspondientes en el modelo ADREP. Esta traducción es crucial para establecer una conexión efectiva entre ambos modelos y permitir una comparación adecuada de la información.
4. Una vez que los datos se han traducido al modelo ADREP, se ha realizado un estudio detallado por niveles. Cada nivel en el modelo ADREP aporta información específica y se enfoca en aspectos particulares del incidente. Al analizar los informes de incidentes aéreos en función de estos niveles, se pueden identificar patrones y tendencias que pueden ser de utilidad para comprender mejor las causas y consecuencias de los incidentes de pérdida de separación en vuelo de severidad A.

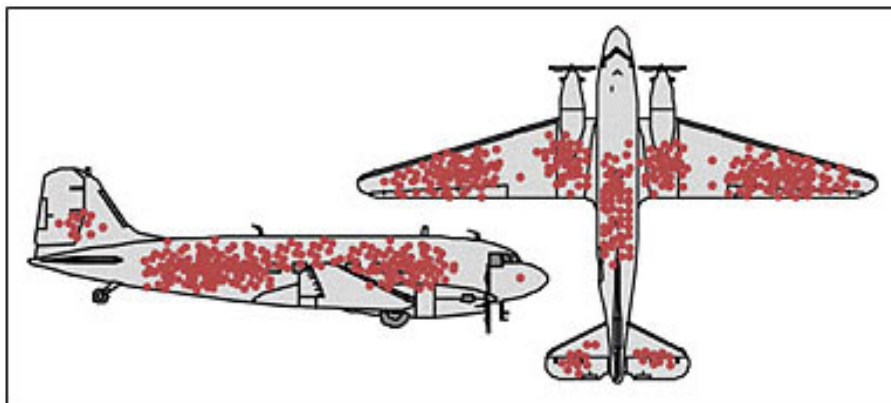
El estudio estadístico realizado y las conclusiones obtenidas acerca de la compatibilidad entre estos modelos se pueden encontrar en el siguiente apartado de este ensayo “Análisis de Resultados”.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1. Introducción: Presuposiciones y Sesgo de Supervivencia

El sesgo de supervivencia es un concepto que se originó en la aviación durante la Segunda Guerra Mundial y tiene implicaciones importantes en el análisis de incidentes aeronáuticos. Este sesgo se refiere a la tendencia a basar nuestras conclusiones y decisiones únicamente en los datos o elementos que han sobrevivido o perdurado, ignorando aquellos que se han perdido o no están disponibles.

Durante la Segunda Guerra Mundial, la aviación militar enfrentó desafíos significativos en términos de seguridad. Se realizó un análisis detallado de los aviones dañados para identificar las áreas que requerían mejoras. Sin embargo, este análisis se centró únicamente en los aviones que regresaron a salvo. Esto llevó a una conclusión de que la información visible es tan importante como la que no está presente en estudios estadísticos donde la muestra no es la totalidad de la población. En el caso específico de la aviación durante la segunda guerra mundial, esto es particularmente visible en la siguiente imagen:



Credit: Cameron Moll

Fig. 5.1. Sesgo de Supervivencia

Como se puede ver, a la hora de analizar cuáles son las zonas del avión que requerían refuerzo, al haber sesgado por aquellos aviones que habían regresado se podía caer en la falsa conclusión de que son las zonas en las que se concentra un mayor número de disparos las que deben ser reforzadas. Sin embargo, al reconocer que el filtro pre-establecido excluye los aviones que fueron derribados, la conclusión real a la que se debe llegar es que las zonas donde no hay registro de disparos son aquellas zonas que requieren refuerzo, ya que los aviones que recibieron disparos en esas zonas fueron derribados.

Este ejemplo ilustra cómo el sesgo de supervivencia puede distorsionar nuestras conclusiones. Aplicándolo al estudio realizado en este ensayo, al analizar solo los incidentes de severidad A y pérdida de separación en vuelo en el marco de la metodología SOAM,

existe el riesgo de pasar por alto otros incidentes o factores que podrían ser relevantes para comprender la seguridad en la aviación, así como llegar a conclusiones inexactas. Al filtrar los datos y centrarse únicamente en los incidentes más graves, es posible sacar conclusiones erróneas que parezcan obvias al estar tratando con incidentes (y no accidentes) y de severidad A, que, recordando su definición, se refiere a un incidente que tiene el potencial de causar una lesión grave o la pérdida de una aeronave, como referencia, se entiende que la diferencia entre un incidente serio y un accidente es solamente el resultado. Y, a diferencia de un incidente de severidad B, implica una instrucción errónea o inacción del ATC.

El impacto de este concepto en los resultados obtenidos se discutirá con ejemplos visuales en la próxima sección de esta memoria.

## 5.2. Resultados SOAM

En esta sección se mostrarán los gráficos obtenidos del estudio estadístico realizado sobre los incidentes de pérdida de separación en vuelo y severidad A analizados utilizando la metodología SOAM.

### 5.2.1. Estudio de Fallos de Barreras

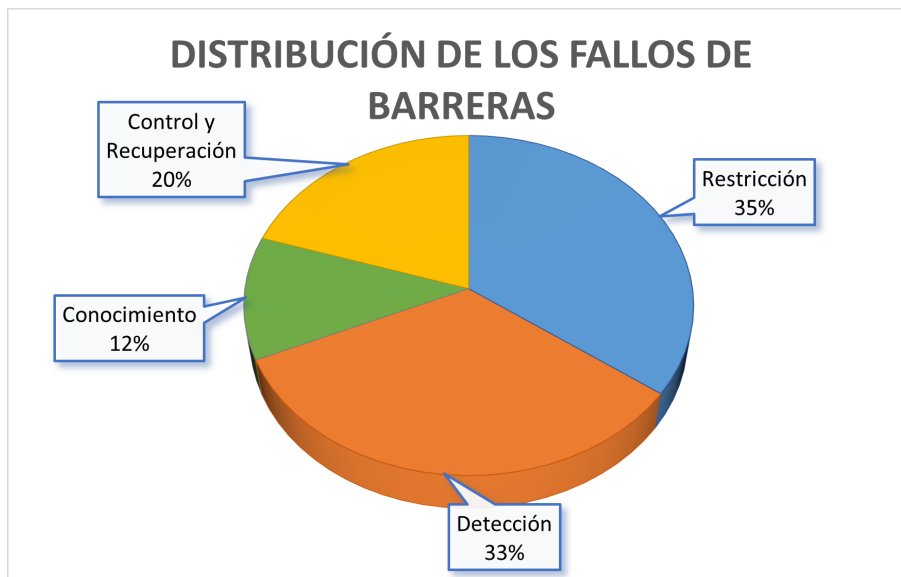


Fig. 5.2. Distribución de los Fallos de Barreras

Este primer gráfico nos muestra una visión general de la distribución de los fallos de barreras (errores o deficiencias en las barreras de seguridad que están diseñadas para prevenir o mitigar los efectos de un incidente) encontrados en estos incidentes. Como se puede ver, hay una presencia mayor de fallos de barreras relacionados con la Restricción y Detección de los incidentes, siendo importante también la existencia de fallos de barreras



de control y recuperación y, en menor medida, fallos de barreras de conocimiento. En los siguientes gráficos se proporcionará un desglose de estos fallos.

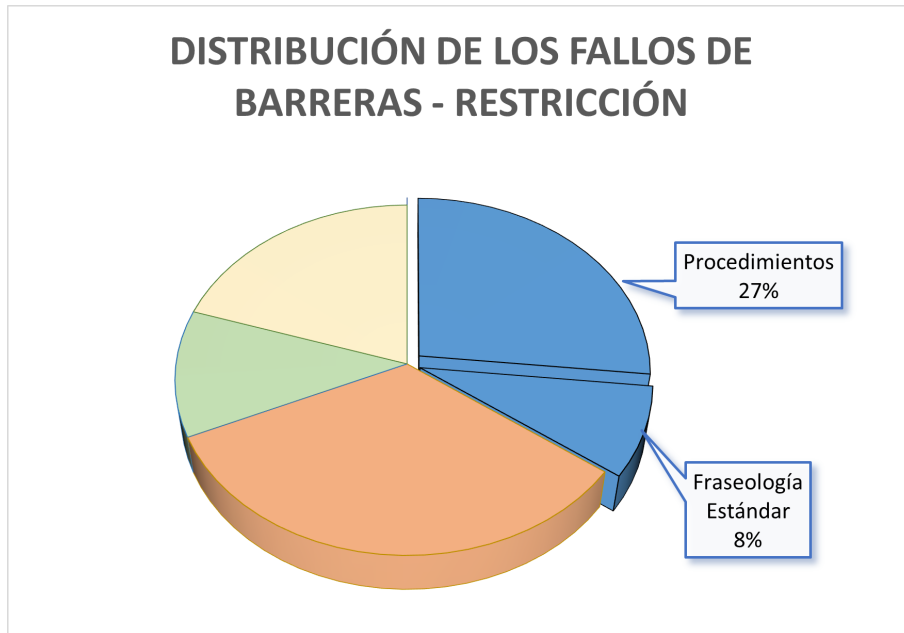


Fig. 5.3. Distribución de los Fallos de Barreras: Restricción

En primer lugar encontramos los fallos de barrera de restricción. Como se introdujo anteriormente, son barreras que, a través de restricción de acciones a través de la normalización de procedimientos, asumen parte de la responsabilidad de la prevención de incidentes y accidentes aéreos. En este estudio se ha encontrado que, en su mayoría, en los incidentes de pérdida de separación de severidad A se tratan de fallos en procedimientos y, en menor medida, de fraseología estándar. Esto es, se deben al no cumplimiento de procedimientos normalizados por parte de ATC o tripulación a bordo y al desuso o uso inadecuado de la fraseología estandarizada.

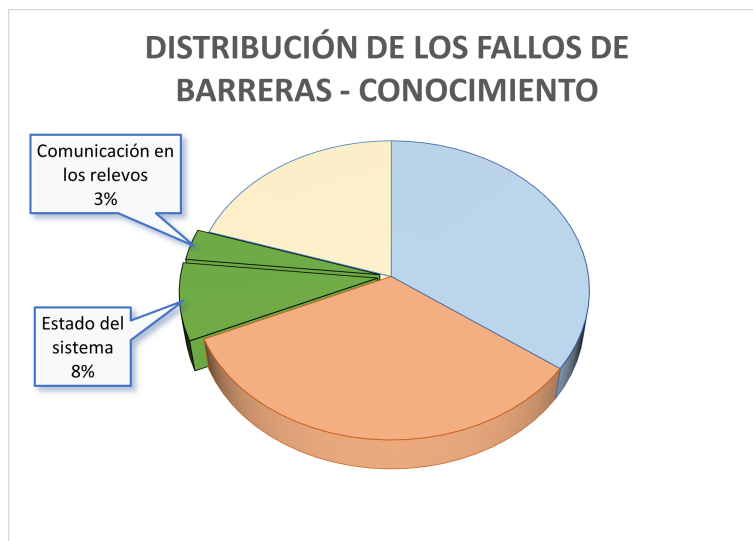


Fig. 5.4. Distribución de los Fallos de Barreras: Conocimiento

Otro tipo de barrera cuyo propósito es la prevención de incidentes es el grupo de barreras de conocimiento. Estas son las barreras que proporcionan información crucial a las personas necesarias para evitar posibles sucesos. A pesar de ser la categoría de fallo con menor presencia, cabe destacar que las sub-categorías más comunes son los fallos de conocimiento del estado del sistema y los fallos de conocimiento debido a malas o ineficientes comunicaciones en los relevos.

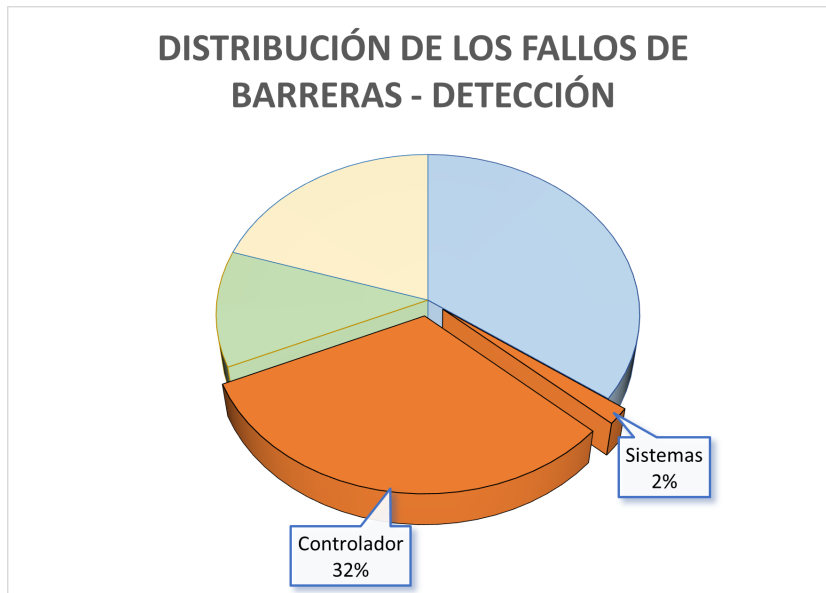


Fig. 5.5. Distribución de los Fallos de Barreras: Detección

Las barreras de detección tienen una función híbrida de prevención y resolución de incidentes. Esto es debido a la fuerte dependencia de las demás barreras de resolución de incidentes en la detección previa. Atendiendo a los datos obtenidos, se puede observar una gran mayoría de casos relacionados con el fallo de detección del posible incidente por parte del controlador, con una minoría de casos relacionados con fallos de sistemas de alerta de detección.

El principal sistema de detección de incidentes disponible para los controladores es el STCA (Short-Term Conflict Alert), este es un sistema de alerta y prevención de conflictos a corto plazo en el ámbito de la aviación. Su objetivo principal es identificar y advertir a los controladores de tráfico aéreo sobre situaciones en las que dos o más aeronaves pueden estar en riesgo de una posible colisión en el espacio aéreo controlado.

El sistema STCA utiliza tecnología de radar y sistemas de vigilancia para monitorizar constantemente la posición, velocidad y altitud de las aeronaves en vuelo. Al analizar estos datos en tiempo real, el sistema STCA puede detectar la aproximación cercana o la posible convergencia de aeronaves que podrían dar lugar a una situación de conflicto.

Cuando el sistema STCA identifica una posible amenaza de conflicto, genera una alerta visual o audible en el centro de control de tráfico aéreo correspondiente. Esta alerta permite que los controladores tomen acciones inmediatas para evitar la colisión, como la emisión de instrucciones de desvío, cambio de altitud o cambio de rumbo a las aeronaves

involucradas.

Esta diferencia tan notable entre los fallos de barreras de detección por parte del controlador y los fallos de los sistemas de detección remarca uno de los puntos principales expuestos en el marco teórico de esta memoria: a medida que los sistemas técnicos se van perfeccionando, el porcentaje de incidentes debido a los factores humanos aumenta en proporción.

Por último encontramos los fallos de barrera de control y recuperación, el propósito de estas barreras es puramente de resolución del conflicto. En el caso de este estudio no encontramos diferentes subcategorías por el concepto introducido en el primer apartado de esta sección. Al haber filtrado por los incidentes de severidad A, por definición, no hubo resolución propuesta por parte del ATC. Por otro lado, debido a que es un incidente y no un accidente, se debió resolver por acción de la tripulación de abordaje por decisión propia o por el sistema TCAS.

El TCAS (Traffic Collision Avoidance System) es un sistema a bordo de las aeronaves diseñado para evitar colisiones en el aire. Se trata de un sistema de alerta y prevención de colisiones basado en transpondedores que opera de manera independiente al control de tráfico aéreo y brinda a los pilotos información en tiempo real sobre la presencia de otras aeronaves cercanas.

El TCAS utiliza señales de radar y tecnología de transpondedores para detectar la posición y la velocidad de las aeronaves cercanas. El sistema evalúa continuamente esta información y calcula trayectorias de vuelo para determinar si hay un riesgo potencial de colisión. Si se detecta una posible colisión, el TCAS emite una advertencia visual y auditiva en la cabina del avión para alertar a los pilotos.

El sistema TCAS opera en base al principio de “ver y evitar”. Proporciona dos tipos principales de alertas:

**Alerta de tráfico:** Cuando el TCAS detecta una aeronave cercana que representa un riesgo de colisión, emite una alerta de tráfico (Traffic Advisory, TA). Esta alerta generalmente consiste en una indicación visual en el panel de instrumentos y una advertencia auditiva para que los pilotos estén conscientes de la presencia del tráfico cercano.

**Resolución de advertencia:** Si el sistema determina que la aeronave cercana representa una amenaza inminente de colisión, se emite una resolución de advertencia (Resolution Advisory, RA). Esta advertencia indica al piloto la acción específica que debe tomar para evitar la colisión, como ascender, descender o mantener la altitud actual.

Es importante destacar que el TCAS es un sistema autónomo y no depende de la comunicación con el control de tráfico aéreo u otros aviones. Permite a los pilotos tomar decisiones rápidas y efectivas para evitar situaciones de colisión, incluso en situaciones de falta de comunicación o cuando las aeronaves involucradas no están siendo monitorizadas por el control de tráfico aéreo.

### 5.2.2. Estudio de la Implicación Humana

En esta sección se estudiará el impacto de la implicación humana en los fallos de barreras. Este estudio se ha realizado buscando en qué etapa de la toma de decisiones se han cometido los fallos más comunes. A continuación se han incluido las gráficas que representan esta información.

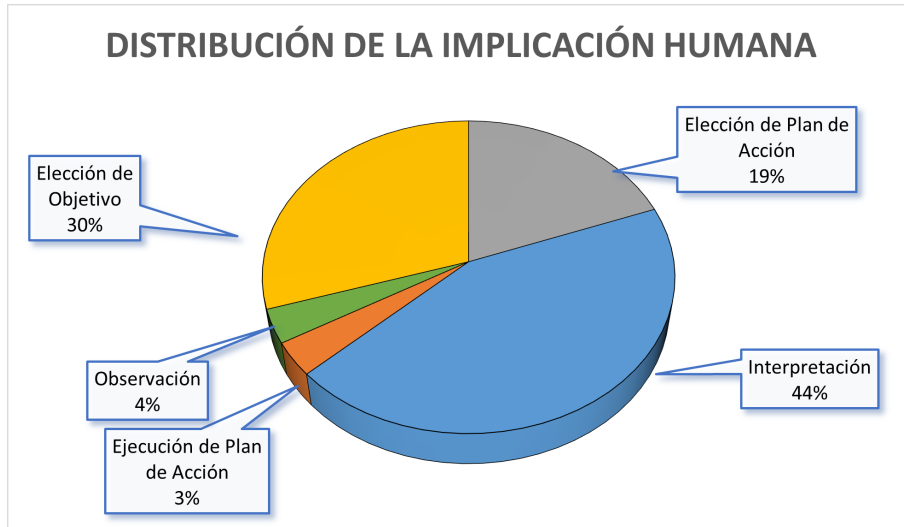


Fig. 5.6. Distribución de la Implicación Humana

Esta gráfica nos proporciona información acerca de las etapas de tomas de decisiones donde se concentran los errores humanos. Se puede observar que, en su mayoría, guardan relación con la interpretación de la situación y la posterior elección de objetivo. Además encontramos -aunque en menor medida- errores en las etapas de observación y elección y ejecución de planes de acción. En las gráficas posteriores se proporcionará un desglose de estos datos.

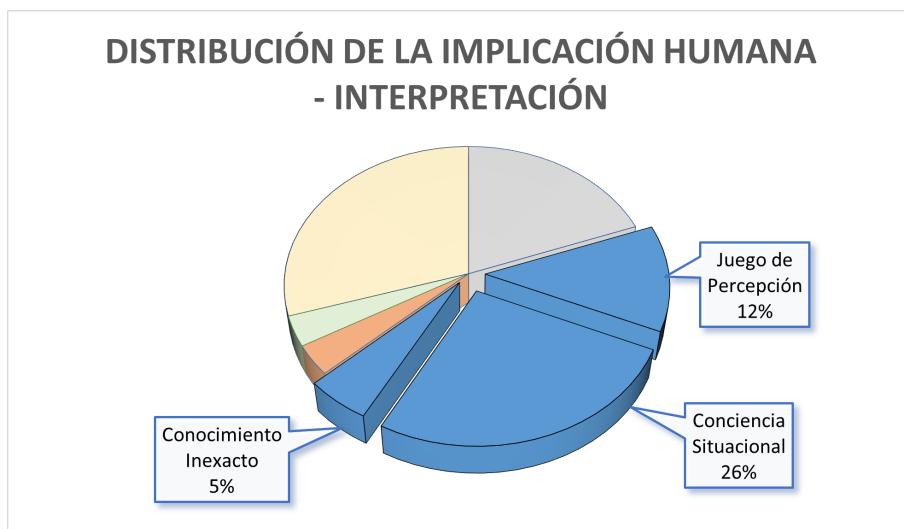


Fig. 5.7. Distribución de la Implicación Humana: Interpretación

En la gráfica anterior se puede ver que, aunque en menor medida encontremos fallos de interpretación debido a conocimiento inexacto, la mayoría de incidencias de esta categoría se deben a una pobre conciencia situacional y al juego de percepción.

En el contexto del SOAM, la implicación humana de interpretación se refiere a los fallos que ocurren debido a la falta de una adecuada conciencia situacional y a los fallos relacionados con el proceso de percepción.

Los fallos debido a una pobre conciencia situacional ocurren cuando una persona no tiene una comprensión completa y precisa de la situación en la que se encuentra. Esto puede deberse a una falta de información, una interpretación incorrecta de los datos disponibles o una falta de atención a los detalles relevantes. Como resultado, las decisiones y acciones tomadas pueden ser inapropiadas o ineficientes.

Por ejemplo, en un incidente aéreo, un piloto podría experimentar una pobre conciencia situacional si no está al tanto de la presencia de otro avión en su proximidad debido a una falta de atención a los avisos de tráfico aéreo o a una mala interpretación de los datos en su pantalla de radar. Esto podría llevar a una pérdida de separación entre los aviones y poner en peligro la seguridad.

Por otro lado, los fallos debidos al juego de percepción ocurren cuando una persona está tan acostumbrada a una situación o a unos procedimientos específicos que tiene dificultades para adaptarse a una situación nueva o inesperada. Esto puede generar una visión de túnel, donde la persona solo se enfoca en los aspectos familiares y no logra reconocer o responder adecuadamente a los cambios en la situación.

Un ejemplo de fallo debido al juego de percepción en la aviación podría ser cuando un controlador de tráfico aéreo está acostumbrado a manejar un tráfico aéreo ligero y de baja densidad, pero de repente se enfrenta a una situación de tráfico intenso y complejo. Debido a su familiaridad con situaciones menos demandantes, el controlador puede tener dificultades para adaptarse rápidamente y tomar decisiones eficientes para mantener la separación adecuada entre las aeronaves.

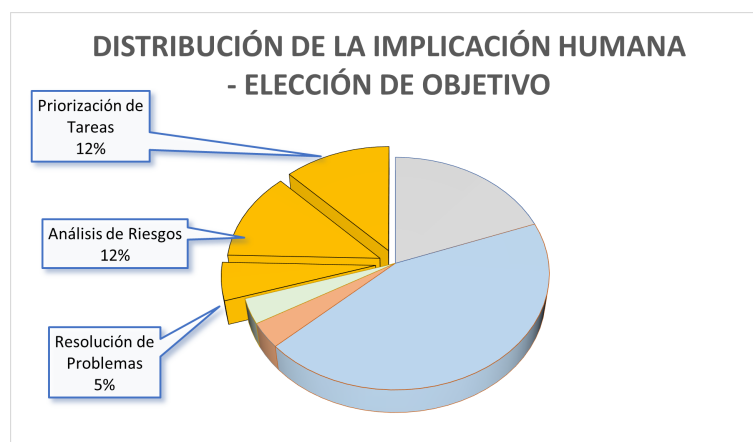


Fig. 5.8. Distribución de la Implicación Humana: Elección de Objetivo

En la gráfica anterior encontramos los errores relacionados con la implicación humana en el paso de elección de objetivo a la hora de tomar decisiones. Como se puede ver, en su mayoría encontramos fallos relacionados con un pobre análisis de riesgos y una mala priorización de tareas. Esto implica que las personas involucradas en una situación aeronáutica no evalúan adecuadamente los riesgos asociados y no asignan correctamente las prioridades a las tareas que deben realizar.

En el caso de los controladores de tráfico aéreo (ATC), los fallos debidos a un pobre análisis de riesgos pueden ocurrir cuando no identifican o subestiman los posibles peligros o situaciones de riesgo en el espacio aéreo que están gestionando. Por ejemplo, un controlador de tráfico aéreo podría no reconocer la posibilidad de una colisión entre dos aeronaves debido a una falta de atención o una mala evaluación de la situación. Esto podría resultar en una falta de instrucciones adecuadas o en la falta de una intervención oportuna para evitar el incidente.

Desde el punto de vista de la tripulación a bordo, los fallos debidos a una mala priorización de tareas pueden ocurrir cuando los pilotos no asignan adecuadamente las prioridades a las acciones que deben tomar durante el vuelo. Por ejemplo, en una situación de emergencia, los pilotos podrían enfocarse en tareas menos críticas en lugar de abordar primero las acciones que podrían garantizar la seguridad de la aeronave y sus ocupantes. Esto podría llevar a una respuesta inadecuada o tardía ante la emergencia, poniendo en riesgo la seguridad de la aeronave.

Un ejemplo específico desde el punto de vista del ATC podría ser cuando un controlador de tráfico aéreo se enfrenta a una situación de tráfico intenso y, en lugar de priorizar la separación entre las aeronaves, se enfoca en la eficiencia de los movimientos y en mantener el flujo de tráfico. Esto podría resultar en una falta de atención a la separación mínima requerida, lo que aumenta el riesgo de una posible colisión.

Desde el punto de vista de la tripulación a bordo, un ejemplo podría ser cuando los pilotos se enfrentan a múltiples alarmas o advertencias en la cabina y no logran priorizar adecuadamente las acciones necesarias para abordar cada situación. En lugar de enfocarse en la identificación y mitigación de la causa principal del problema, podrían distraerse con tareas secundarias menos críticas, lo que puede afectar negativamente la resolución del problema principal y aumentar el riesgo de un incidente o accidente.

### 5.2.3. Estudio de las Condiciones Contextuales

En este apartado se analizarán los resultados estadísticos obtenidos en relación con las condiciones contextuales o pasivas, para posteriormente estudiar su impacto en las condiciones activas (implicación humana) para desembocar en un fallo de barrera. A continuación se incluyen los gráficos que representan esta información:

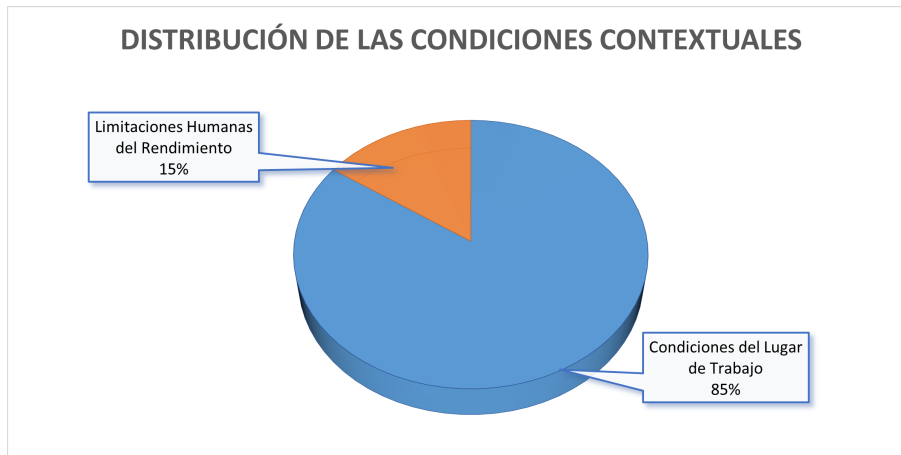


Fig. 5.9. Distribución de las Condiciones Contextuales

La gráfica muestra la distribución de las condiciones contextuales identificadas en el análisis SOAM de incidentes aéreos de severidad A. Se representan dos categorías principales: “Condiciones del Lugar de Trabajo” y “Limitaciones Humanas del Rendimiento”.

La gráfica muestra que la mayoría de los incidentes analizados están asociados con “Condiciones del Lugar de Trabajo”, lo cual indica que los factores relacionados con el entorno físico y las condiciones laborales desempeñan un papel significativo en la ocurrencia de estos incidentes. Estas condiciones pueden incluir aspectos como las presiones de tiempo, la organización de turnos, el estado de las comunicaciones, el diseño de la interfaz hombre/sistema, la disponibilidad de equipos y herramientas, y otros elementos del entorno de trabajo que pueden influir en el desempeño de las personas.

Por otro lado, se observa una presencia notable pero minoritaria de “Limitaciones Humanas del Rendimiento”. Esto implica que factores relacionados con las capacidades y limitaciones humanas también contribuyen a la ocurrencia de los incidentes, aunque en menor medida en comparación con las condiciones del lugar de trabajo. Estas limitaciones pueden incluir aspectos como la fatiga, el estrés, la carga de trabajo excesiva, la falta de entrenamiento o habilidades específicas, entre otros.

La gráfica resalta la importancia de prestar atención tanto a las condiciones del lugar de trabajo como a las limitaciones humanas al analizar los incidentes aéreos de severidad A. Si bien las condiciones del lugar de trabajo pueden ser el factor predominante, es fundamental considerar también las capacidades y limitaciones humanas para comprender plenamente los factores que contribuyeron a la ocurrencia de estos incidentes.

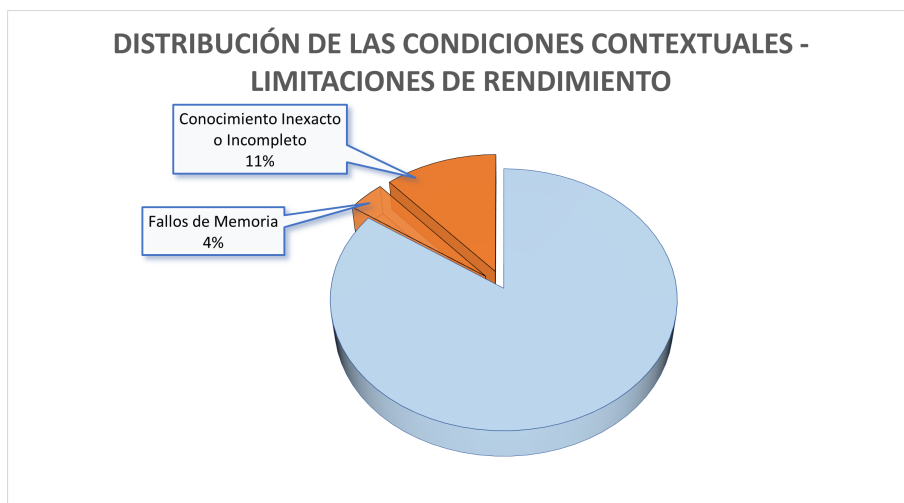


Fig. 5.10. Distribución de las Condiciones Contextuales: Limitaciones Humanas de Rendimiento

Dentro de la categoría de “Limitaciones Humanas del Rendimiento”, se identifican principalmente dos tipos de casos: “conocimiento inexacto o incompleto” y “fallos de memoria”. Estos casos están asociados con el personal del control de tráfico aéreo (ATC) y su capacidad para realizar sus funciones de manera efectiva.

En relación al “conocimiento inexacto o incompleto”, se refiere a situaciones en las que el ATC tiene información incorrecta o incompleta sobre el rendimiento de diferentes aviones. Por ejemplo, puede ocurrir que el ATC no esté al tanto de las características específicas de un avión, como su velocidad de ascenso o las limitaciones relacionadas con tener el tren de aterrizaje desplegado por algún fallo mecánico o exceso de temperatura en los frenos. Esto puede llevar a decisiones erróneas o asignaciones inadecuadas de rutas o altitudes para las aeronaves, lo cual puede comprometer la seguridad y contribuir a la ocurrencia de incidentes.

Un ejemplo concreto sería cuando el ATC asigna una posición de espera o una aproximación a un avión que no puede cumplir debido a sus limitaciones de rendimiento. Esto puede resultar en situaciones peligrosas, como una aproximación inestable o una capacidad insuficiente para mantener una altitud específica. Estos casos resaltan la importancia de que el personal del ATC esté completamente informado sobre las capacidades y limitaciones de cada tipo de avión para tomar decisiones adecuadas y seguras.

En menor medida, también se observan casos de “fallos de memoria” en el personal del ATC. Estos fallos pueden implicar la incapacidad de recordar información crítica en momentos clave. Por ejemplo, puede suceder que el ATC olvide un detalle importante de una comunicación previa con una aeronave, como una instrucción específica o una limitación que se le haya comunicado. Este tipo de fallos de memoria pueden tener consecuencias negativas, ya que se pueden tomar decisiones basadas en información incorrecta o incompleta.



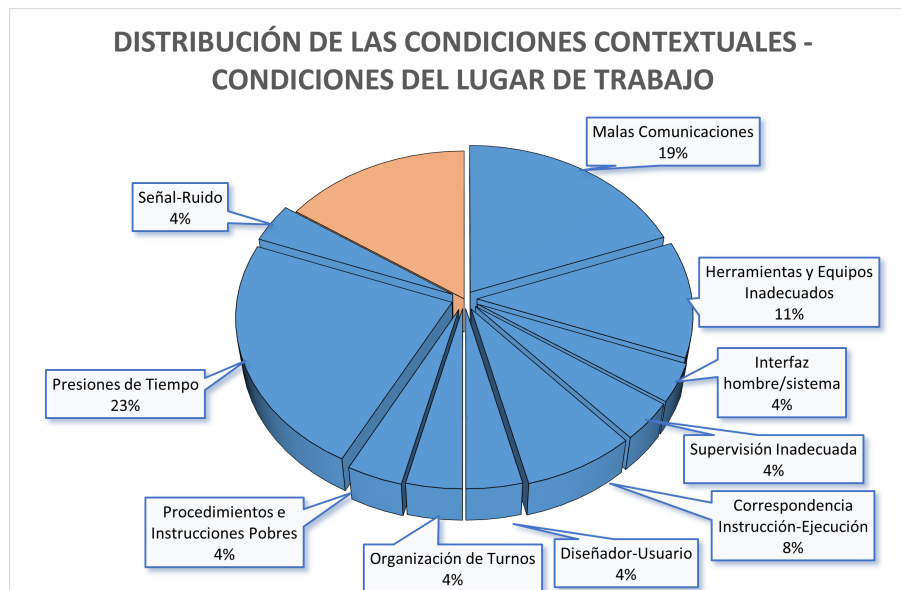


Fig. 5.11. Distribución de las Condiciones Contextuales: Condiciones del Lugar de Trabajo

Dentro de la categoría de “Condiciones del Lugar de Trabajo”, se identifican diversos factores que pueden influir en la seguridad y eficiencia de las operaciones de control de tráfico aéreo (ATC). Estos factores abarcan desde aspectos relacionados con la presión del entorno laboral hasta la calidad de las comunicaciones y la adecuación de las herramientas y equipos utilizados. A continuación, describiré los principales casos identificados en cada subcategoría:

- **Presiones de Tiempo:** Este factor se refiere a situaciones en las que el personal del ATC enfrenta altas demandas y restricciones de tiempo debido a la alta densidad de tráfico, la limitación del espacio aéreo y las condiciones meteorológicas desfavorables. Estas presiones pueden afectar la toma de decisiones, la capacidad de planificación y la atención del ATC, lo que aumenta el riesgo de errores y la posibilidad de incidentes.
- **Malas Comunicaciones:** En este caso, se destacan los problemas relacionados con la comunicación en el entorno de trabajo del ATC o la cabina de la aeronave. Estos problemas pueden incluir dificultades para comunicarse con los pilotos, comunicaciones inestables o interrumpidas, y la saturación de frecuencias de radio. Una comunicación ineficiente o deficiente puede dificultar la transmisión de información crítica y generar malentendidos, lo que puede comprometer la seguridad de las operaciones.
- **Herramientas y equipos inadecuados:** Este factor se refiere a la falta de calidad, funcionamiento deficiente o limitaciones en las herramientas y equipos utilizados por el personal del ATC en general o en un momento puntual. Un ejemplo destacado es el contexto de fallos en el sistema STCA (Sistema de Alerta de Colisión de Tráfico) que genera alarmas constantes y puede sobrecargar al ATC, dificultando su capacidad de atención y toma de decisiones adecuadas.

Además de estos casos principales, también se identifican otros factores que contribuyen a las condiciones del lugar de trabajo y que pueden tener un impacto menor pero significativo en la seguridad y eficiencia del ATC:

- **Mala relación señal-ruido:** Se refiere a la interferencia o distorsión en las señales de comunicación o información, lo que dificulta la recepción y comprensión adecuada de los mensajes.
- **Procedimientos e instrucciones pobres:** Cuando los procedimientos y las instrucciones utilizados por el personal del ATC son confusos, ambiguos o carecen de claridad, pueden generar malentendidos y errores en la ejecución de las tareas.
- **Mala organización de turnos:** La programación inadecuada de los turnos de trabajo, como largas jornadas laborales o falta de descanso adecuado, puede afectar negativamente la atención, la concentración y el rendimiento del personal del ATC.
- **Falta de entendimiento diseñador-usuario:** Se refiere a la falta de comprensión o consideración de las necesidades y capacidades del personal del ATC en el diseño de los sistemas, lo que puede dificultar su uso eficiente y seguro.
- **Pobre correspondencia entre las instrucciones de trabajo y su ejecución:** Cuando existe una discrepancia entre las instrucciones proporcionadas al personal del ATC y la forma en que se ejecutan en la práctica, puede generar confusión y errores.
- **Supervisión inadecuada:** La falta de supervisión efectiva y adecuada del personal del ATC puede contribuir a la aparición de errores y malas prácticas, así como a la falta de retroalimentación y mejora continua.
- **Pobre interfaz hombre/sistema:** Cuando la interacción entre el personal del ATC y los sistemas informáticos o de control es compleja, poco intuitiva o propensa a errores, puede dificultar la eficiencia y la seguridad en la realización de las tareas.

Entendiendo esta distribución de condiciones contextuales, el siguiente paso es estudiar su impacto en la implicación humana para hilar una cadena coherente de hechos. Este estudio se realiza en el siguiente apartado.

### 5.3. Ruta de Fallo

Tras el estudio estadístico realizado en los apartados anteriores sobre cada una de las clasificaciones de componentes reconocidos por el modelo SOAM que están involucrados en un incidente aeronáutico, el paso final es el estudio del impacto entre capas para formar la ruta de fallo más común. El objetivo de obtener estas cadenas es encontrar los errores latentes y los sectores donde se requiere una capa adicional de protección para evitar este tipo de incidentes en el futuro.

El acercamiento que se ha adoptado es encontrar las rutas de fallo más comunes relacionadas con los tipos de fallos de barreras más prevalentes. Una vez realizado el estudio estadístico de este impacto, se han creado esquemas que muestren estas cadenas, estos gráficos se incluyen a continuación:

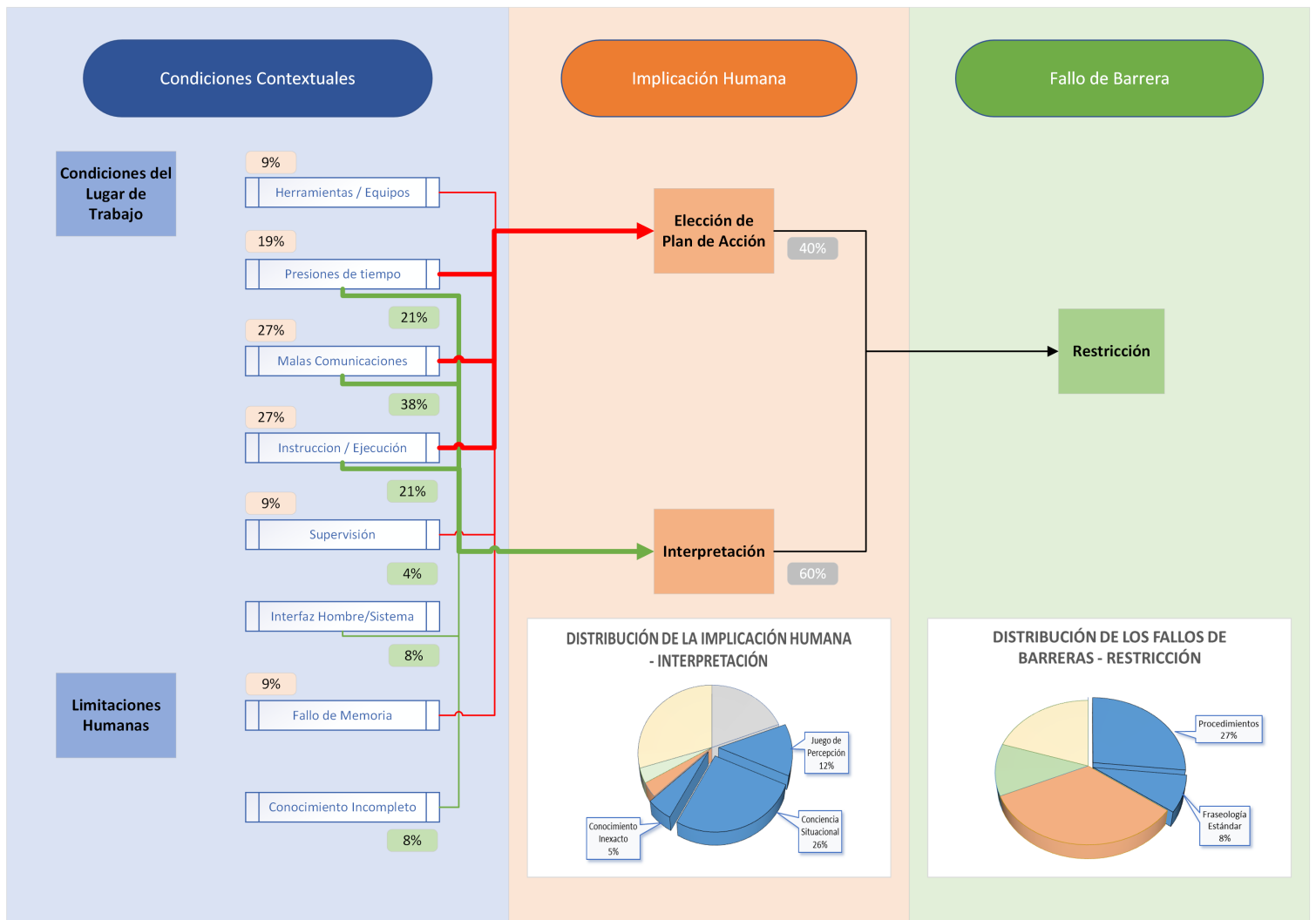


Fig. 5.12. Ruta de Fallo - Restricción

El estudio estadístico realizado mediante la metodología SOAM revela este esquema representativo que muestra las interrelaciones entre los diferentes factores involucrados en los fallos de barreras de restricción, cuyo propósito es prevenir incidentes. En este esquema, se observa que los errores en las fases de toma de decisiones, específicamente en la “Interpretación” y “ Elección de plan de acción”, tienen una influencia significativa en los fallos de barreras.

En primer lugar, se identifica que las implicaciones humanas relacionadas con la “ Interpretación” juegan un papel importante en los fallos de barreras. Estos fallos se refieren a la incorrecta comprensión o interpretación de la información disponible por parte del personal del ATC. Como se mencionó en el anterior apartado, esto suele ser resultado de una pobre conciencia situacional o al juego de percepción.

En segundo lugar, los fallos en la “Elección de plan de acción” también tienen un impacto significativo en los fallos de barreras. Esto se refiere a la capacidad del personal del ATC para seleccionar y priorizar adecuadamente los pasos y procedimientos necesarios para abordar una situación anómala. Por ejemplo, un controlador aéreo puede tomar decisiones inadecuadas en cuanto a las rutas de vuelo asignadas a las aeronaves o no priorizar correctamente las acciones necesarias para evitar la pérdida de separación entre aviones.

En cuanto a las condiciones contextuales que influyen en las implicaciones humanas de “ Interpretación” y “ Elección de plan de acción” , se destaca la categoría de “Condiciones del Lugar de Trabajo”. Dentro de esta categoría, se identifican tres factores principales que afectan a los controladores aéreos.

En primer lugar, las “Presiones de Tiempo” son un factor relevante. Esto se refiere a las altas demandas y restricciones de tiempo a las que se enfrenta el personal del ATC debido a la alta densidad de tráfico, la limitación del espacio aéreo y las condiciones meteorológicas desfavorables. Estas presiones pueden comprometer la capacidad de toma de decisiones y la atención del controlador aéreo.

En segundo lugar, las “Malas Comunicaciones” también tienen un impacto significativo. Esto incluye dificultades en la comunicación con los pilotos, problemas de estabilidad o interrupción de las comunicaciones y la saturación de las frecuencias de radio. Una comunicación deficiente puede dificultar la transmisión precisa de información crucial entre el controlador aéreo y los pilotos, lo que puede conducir a malentendidos y errores.

Por último, la “Pobre correspondencia entre las instrucciones de trabajo y su ejecución” también se destaca como un factor que influye en las implicaciones humanas. Esto se refiere a las discrepancias entre las instrucciones proporcionadas al personal del ATC o la tripulación a bordo y la forma en que se ejecutan en la práctica. Si las instrucciones no se alinean con la realidad operativa o si existe una falta de claridad en su implementación, esto puede generar confusión y errores en la toma de decisiones y la selección de acciones.

En menor medida, se puede observar el impacto de la categoría “Limitaciones Humanas del Rendimiento” sobre las implicaciones humanas, donde los fallos de memoria afectan principalmente en la etapa de elección de plan de acción, y, por otro lado, el conocimiento incompleto (normalmente acerca de las performance de las aeronaves) resulta en errores en la etapa de “Interpretación” de la toma de decisiones.

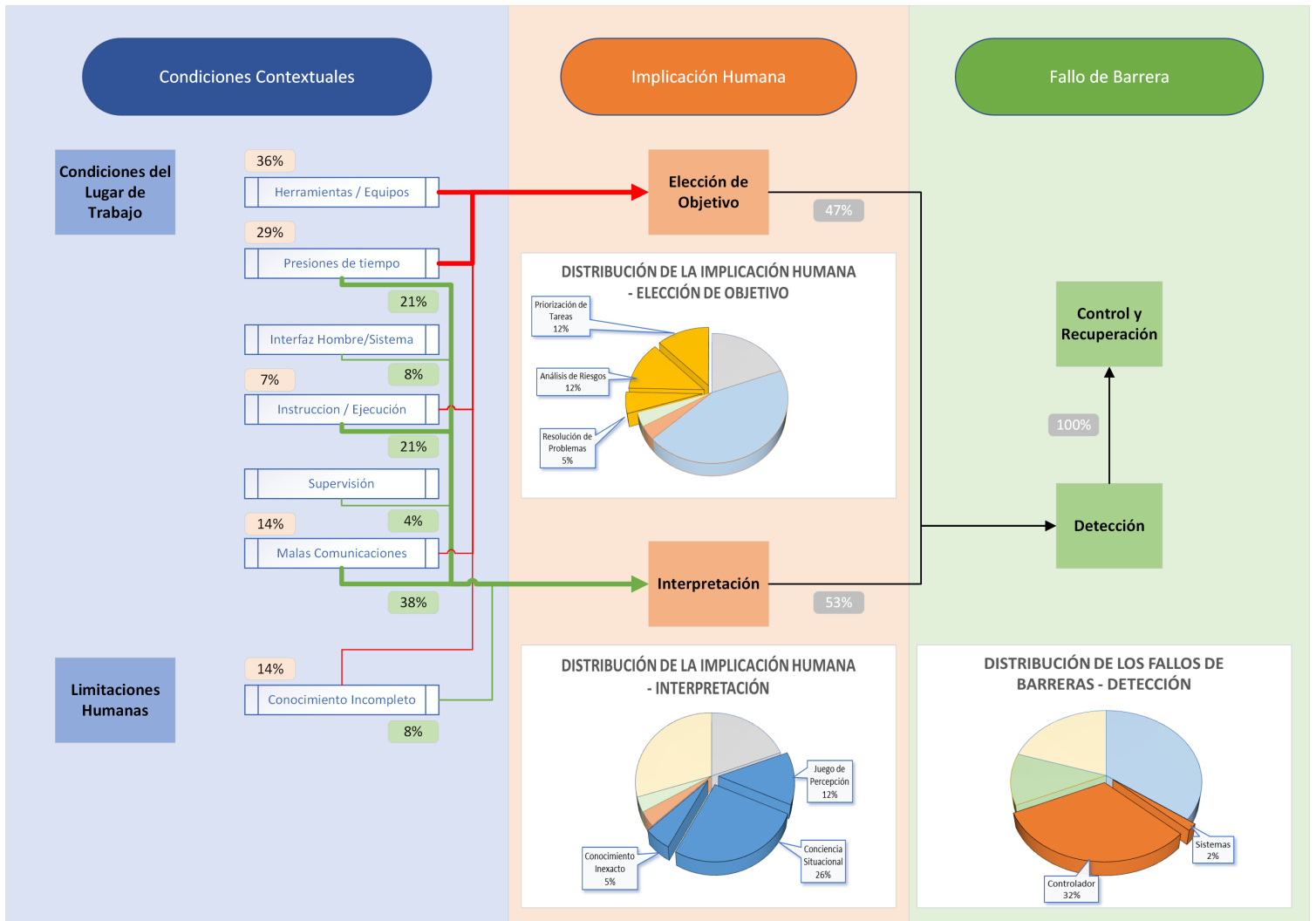


Fig. 5.13. Ruta de Fallo - Detección y Resolución de Conflicto

En este esquema representativo se muestran las interrelaciones entre los fallos de barreras de detección y las implicaciones humanas relacionadas con errores en las fases de toma de decisiones: “Interpretación” y “Elección de objetivo”. Estos fallos de barreras de detección desempeñan un papel crucial tanto en la prevención de incidentes como en su resolución, ya que dependen de la detección previa para activar las barreras de resolución.

En primer lugar, los fallos de “Interpretación” son similares a los mencionados en el esquema anterior. Se refieren a la incorrecta comprensión o interpretación de la información disponible por parte del personal del ATC. Estos errores pueden manifestarse en malentendidos de las instrucciones de los pilotos, la interpretación incorrecta de las condiciones meteorológicas u otros factores relevantes.

En segundo lugar, los fallos en la “Elección de objetivo” están relacionados con la mala priorización de tareas y los pobres análisis de riesgos. Esto implica que el personal del ATC puede tomar decisiones inadecuadas en cuanto a qué tareas priorizar y cómo evaluar los riesgos asociados. Por ejemplo, pueden no asignar la debida importancia a ciertos factores de riesgo o no considerar todas las opciones disponibles antes de elegir un objetivo o plan de acción.

Estos fallos en la “Elección de objetivo” están influenciados por ciertas condiciones contextuales. En primer lugar, las “Presiones de Tiempo” desempeñan un papel relevante. Esto se refiere a las altas demandas y restricciones de tiempo a las que se enfrenta el personal del ATC debido a la alta densidad de tráfico, la limitación del espacio aéreo y las condiciones meteorológicas desfavorables. Estas presiones pueden afectar la capacidad del personal del ATC para realizar un análisis exhaustivo de riesgos y priorizar adecuadamente las tareas.

Además, las “Herramientas y equipos inadecuados” también influyen en los fallos de la elección de objetivo. Esto se refiere a la falta de calidad, funcionamiento deficiente o limitaciones en las herramientas y equipos utilizados por el personal del ATC. Por ejemplo, si el sistema de visualización de datos o las comunicaciones no son confiables o no proporcionan la información necesaria de manera clara, puede dificultar la toma de decisiones y el análisis de riesgos.

En menor medida, se puede observar el impacto de la categoría “Limitaciones Humanas del Rendimiento” sobre las implicaciones humanas, donde los fallos relacionados con el conocimiento incompleto (normalmente acerca de las performance de las aeronaves) resulta en errores en la etapas tanto de “Interpretación” como de “Elección de Objetivo” de la toma de decisiones.

Por último, es importante destacar la correlación encontrada del 100 % entre los incidentes con fallos de barreras de detección y la presencia adicional de fallos de barreras de control y recuperación. Retomando el principio de sesgo de supervivencia, no es responsable sacar una generalización acerca de la relación entre estos dos tipos de fallos. Esto es debido a que el filtro pre-establecido de los incidentes para seleccionar solamente aquellos de severidad A, trae consigo la definición que establece que se refiere a un incidente que tiene el potencial de causar una lesión grave o la pérdida de una aeronave, como referencia, se entiende que la diferencia entre un incidente serio y un accidente es solamente el resultado. Y, a diferencia de un incidente de severidad B, implica una instrucción errónea o inacción del ATC.

Por el mismo motivo, aunque la gran mayoría de estos incidentes se resolvieran por la acción respecto a un TCAS RA (Resolución), no se pueden realizar generalizaciones relacionadas con la efectividad de este sistema ya que, al tratarse de un estudio sobre incidentes y no accidentes, debe haber existido un agente, acción o sistema que haya impedido que fuera un accidente.

## 5.4. Resultados ADREP y Comparación Entre Modelos

En este apartado se estudiarán y analizarán los datos estadísticos obtenidos siguiendo los pasos definidos en el apartado de “Metodología: Correlación SOAM-ADREP”, para posteriormente obtener conclusiones acerca de la compatibilidad entre estos dos modelos.

Como se ha introducido, la taxonomía ADREP permite definir cada elemento encontrado en una investigación con un nivel de especificidad superior a la mayoría de modelos contemporáneos. Esto es debido a su uso para realizar estudios estadísticos y mantener grandes bases de datos. Esto se refleja en la estructura por niveles de los códigos de designación. Con el objetivo de poder realizar generalizaciones acerca de la información obtenida, se han obtenido gráficas con niveles crecientes de especificidad y se han incluido en los siguientes apartados.

### 5.4.1. Estudio de los Eventos

En primer lugar se han estudiado los eventos, lo que la metodología ADREP define como sucesos ocurridos que han influido en la aparición de un incidente. En la siguiente gráfica se muestra el primer nivel de clasificación de los eventos identificados:

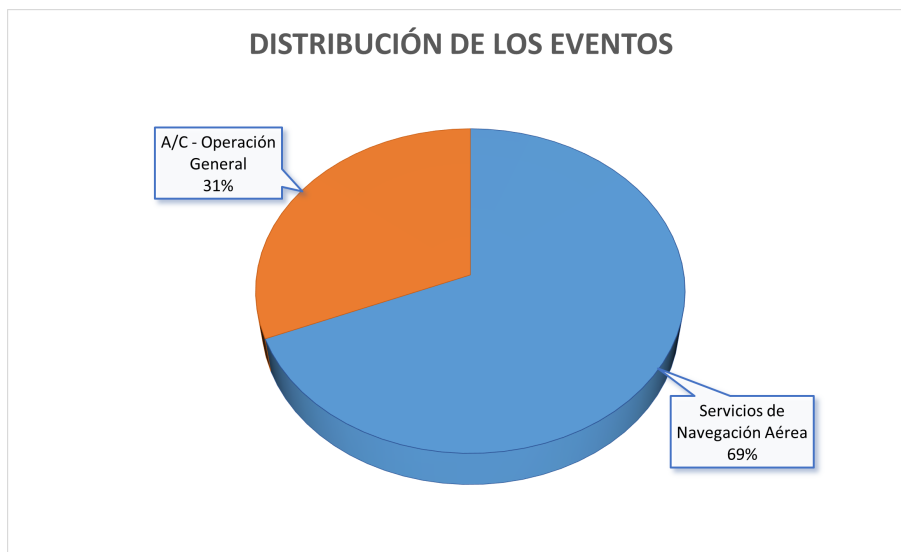


Fig. 5.14. Distribución de los Eventos

Como se puede ver, principalmente se encuentran dos grupos de eventos. La mayoría pertenece a aquellos eventos relacionados puramente con los servicios de navegación aérea, mientras que el grupo restante define eventos relacionados con la aeronave, ya sea su operación general o comunicación entre la misma y el ATC.

En las siguientes gráficas se ofrece un desglose del siguiente nivel de clasificación de estos eventos.

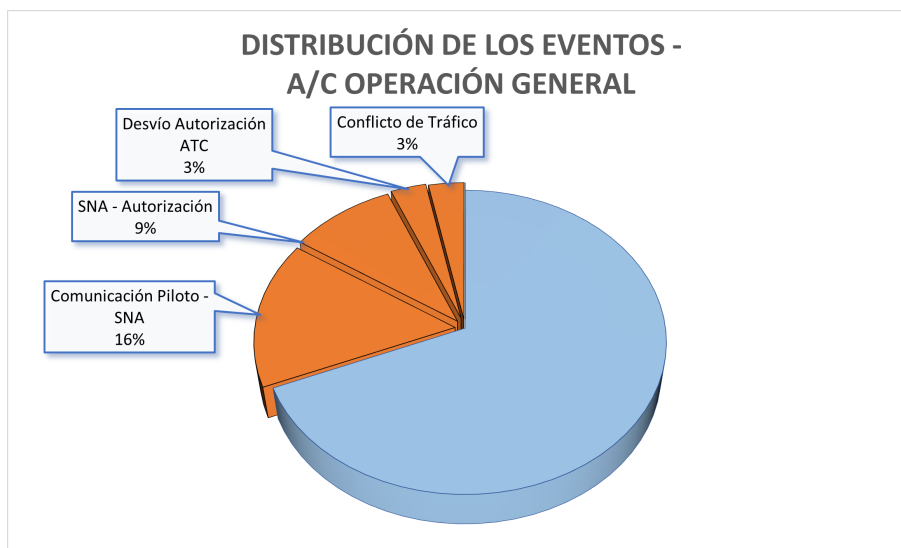


Fig. 5.15. Distribución de los Eventos: Operación de Aeronave

En esta gráfica se puede ver como los eventos relacionados con la aeronave se deben principalmente a fallos de comunicación entre la tripulación a bordo y los servicios de navegación aérea, autorizaciones imprecisas y desvíos de las autorizaciones del ATC.

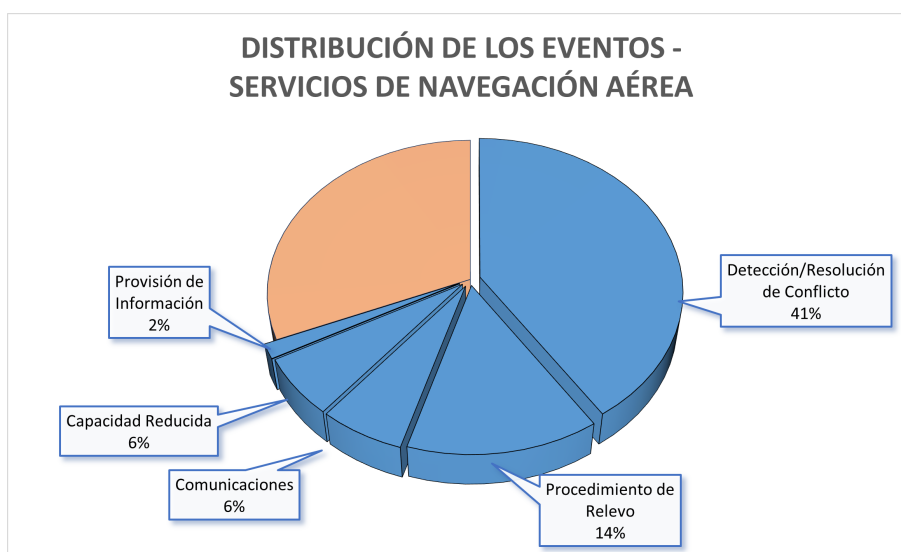


Fig. 5.16. Distribución de los Eventos: Servicios de Navegación Aérea

La información presentada en este diagrama define un grupo más común que el resto, muestra que la mayoría de los eventos relacionados con los servicios de navegación aérea se deben a la detección y resolución de conflictos. Con una presencia menor se pueden ver también eventos relacionados con los procedimientos de relevó (entre controladores o entre sectores), errores de comunicación, eventos de capacidad reducida y casos anecdóticos de errores en la provisión de información. Posteriormente se realizará un análisis de las comparaciones que se pueden dibujar entre estos datos y los obtenidos con el análisis realizado mediante la metodología SOAM.



### 5.4.2. Estudio de los Factores Descriptivos

En este apartado se hará un análisis similar al del anterior apartado pero esta vez de los factores descriptivos obtenidos.

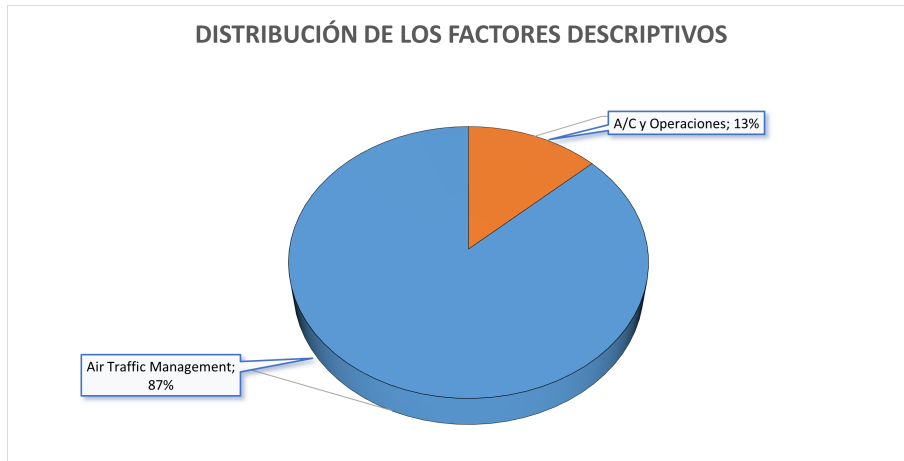


Fig. 5.17. Distribución de los Factores Descriptivos

En un primer nivel, vemos que los factores descriptivos siguen una tendencia similar a los eventos describiendo una gran mayoría relacionada con los servicios ATM y un grupo menor de factores descriptivos relacionados con la aeronave y sus operaciones.

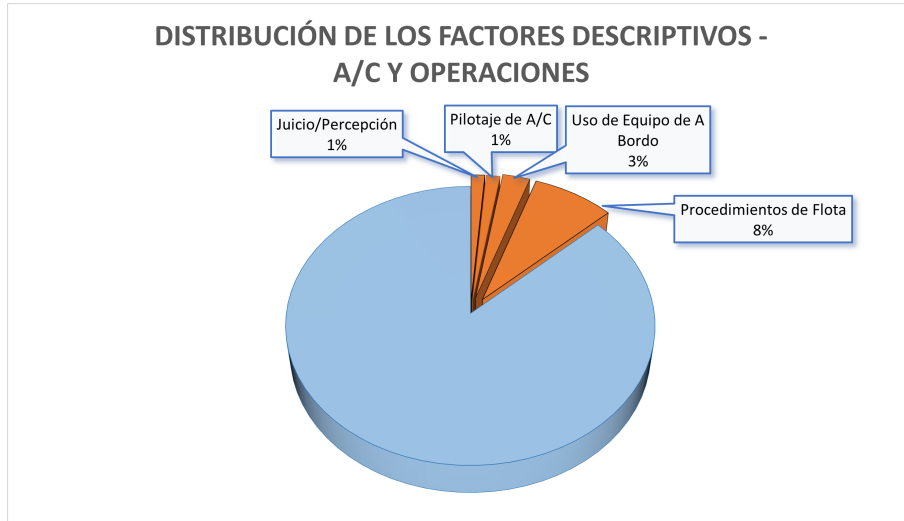


Fig. 5.18. Distribución de los Factores Descriptivos: Operación de Aeronave

Desglosando el grupo minoritario, vemos que principalmente los factores descriptivos de operación de la aeronave están relacionados principalmente con imprecisiones a la hora de realizar los procedimientos de flota y el uso del equipo de a bordo.

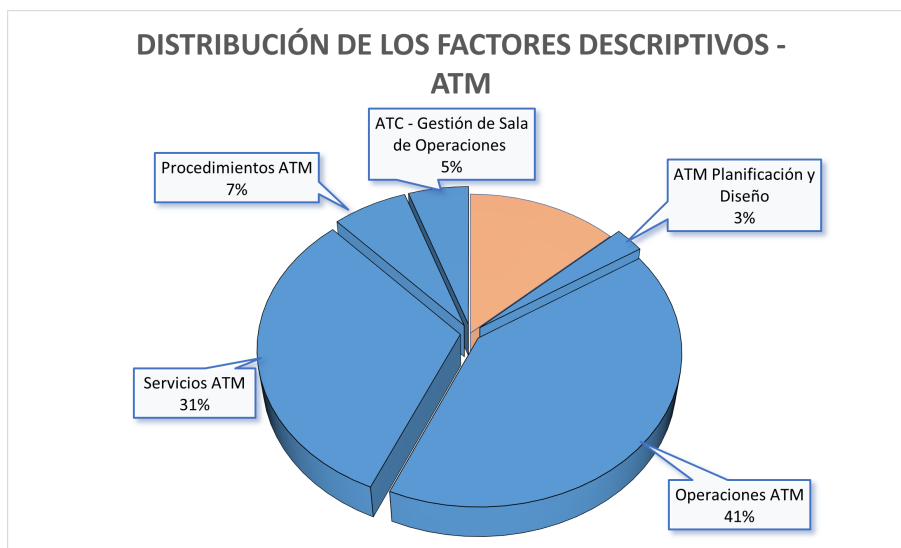


Fig. 5.19. Distribución de los Factores Descriptivos: ATM

En cuanto al grupo mayoritario de los factores descriptivos, los relacionados con el ATM, encontramos que hay dos grupos predominantes: los servicios y las operaciones ATM. A continuación se va a proporcionar una representación gráfica del desglose de cada uno de estas dos subcategorías.

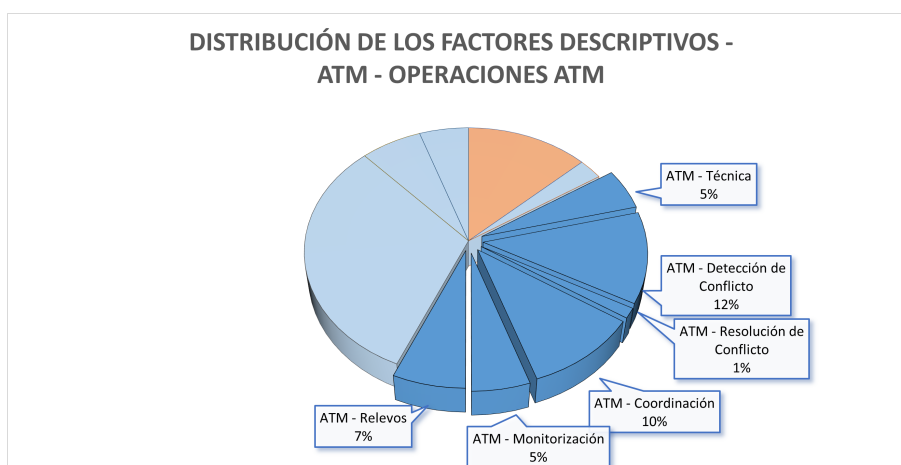


Fig. 5.20. Distribución de los Factores Descriptivos: ATM - Operaciones ATM

En cuanto a las operaciones ATM, encontramos que principalmente existen factores descriptivos con influencia en eventos ADREP relacionados con la detección de conflictos, así como los relevos y la coordinación entre sectores ATM.

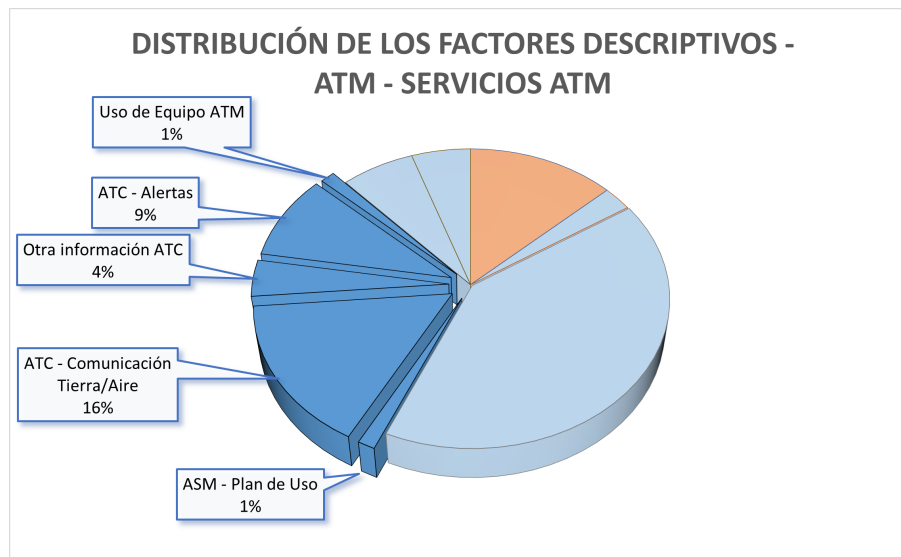


Fig. 5.21. Distribución de los Factores Descriptivos: ATM - Servicios ATM

En esta gráfica se puede ver que los principales factores descriptivos de servicios ATM definen desviaciones en el establecimiento de comunicaciones tierra/aire y alertas esenciales para proporcionar el servicio de gestión del tráfico aéreo.

### 5.4.3. Comparación Entre Modelos

Aunque hay una relación entre los factores descriptivos del modelo ADREP y la implicación humana y condiciones contextuales del modelo SOAM, las estructuras de ambos modelos difieren en su enfoque y objetivos. El modelo SOAM se centra en analizar los fallos de barreras preventivas, mientras que el modelo ADREP se enfoca en categorizar los eventos (con los factores descriptivos correspondientes) ocurridos para su posterior estudio estadístico.

Tras comprender la diferencia estructural entre estos dos modelos, el siguiente paso ha sido comprobar la compatibilidad entre ellos. A la hora de realizar esta comparación entre los modelos SOAM y ADREP, se han querido confirmar o desmentir las siguientes posibles hipótesis:

- En primer lugar se ha querido estudiar la posibilidad de que el modelo SOAM fuera una evolución natural del modelo ADREP, sin embargo, se encontraron diferencias significativas debido a los enfoques distintos de ambas metodologías. Aunque inicialmente se buscaba que la única diferencia entre los modelos fuera la estructura de los elementos, se descubrió que había casos en los que dos datos diferentes se definían en categorías distintas utilizando el modelo ADREP, pero pertenecían a la misma categoría en el modelo SOAM. Del mismo modo, se encontraron situaciones en las que ocurría lo contrario.

Estas discrepancias entre las categorías y la clasificación de los datos en ambos modelos demuestran que no existe una relación lineal directa entre ellos, y que no se puede considerar al modelo SOAM como una evolución natural del modelo ADREP. Aunque ambos modelos tratan de abordar los incidentes aéreos y buscan identificar factores y causas, sus enfoques son distintos y sus estructuras reflejan esas diferencias.

- Una vez descartada la primera hipótesis, se ha llevado a cabo un estudio para analizar la posibilidad de obtener información complementaria al aplicar ambos modelos en conjunto. Los resultados de este estudio han revelado que, debido a las diferencias de enfoque entre estos modelos, la información obtenida no solo no es mutuamente excluyente, sino que también aporta datos diferentes y complementarios.

El modelo SOAM proporciona una perspectiva más detallada y profunda sobre los factores y causas que contribuyen a los incidentes aéreos. Se centra en identificar los fallos de barreras y comprender las razones subyacentes detrás de ellos, considerando aspectos relacionados con el sistema, la toma de decisiones y los procesos de trabajo. Esto permite obtener información valiosa sobre las deficiencias organizativas, los factores humanos y los errores en la gestión de riesgos.

Por otro lado, se ha podido comprobar que el modelo ADREP destaca por su amplia taxonomía, que permite la categorización y clasificación detallada de los eventos relacionados con incidentes aéreos. Proporciona una estructura sistemática para registrar y archivar información sobre los diferentes tipos de eventos y sus factores descriptivos. Esto facilita el análisis estadístico, la creación de bases de datos y la identificación de patrones y tendencias a nivel global.

## 6. CONCLUSIONES & TRABAJOS FUTUROS

En conclusión, el modelo SOAM de investigación de incidentes, basado en el modelo de queso suizo de Reason, ha surgido en un contexto en el que se ha reconocido la importancia de abordar la implicación humana en la seguridad aérea. Este modelo ha sido desarrollado con el objetivo de apoyar la implementación de ESARR 2 (European Action Plan for Air Traffic Safety) y el Strategic Safety Action Plan.

Una de las principales ventajas del modelo SOAM es que proporciona informes de mayor calidad y con una mayor cantidad de información. Permite identificar de manera clara y concisa las causas de los incidentes, y va más allá de simplemente atribuir los errores a factores humanos. El modelo busca identificar las causas subyacentes relacionadas con el sistema, como las condiciones contextuales y los factores organizacionales que contribuyen a los incidentes.

Otro beneficio clave del modelo SOAM es que asegura la generación de recomendaciones relevantes y efectivas para prevenir incidentes futuros. Al considerar no solo los errores humanos, sino también las condiciones contextuales y los factores organizacionales, se pueden proponer soluciones más completas y específicas.

El modelo SOAM es aplicable tanto a eventos simples como a eventos de alta severidad. Puede adaptarse a diferentes tipos de incidentes y es compatible con otros modelos utilizados ampliamente en la industria de la aviación, como el modelo ADREP (Aircraft Accident/Incident Data Reporting).

A partir del estudio realizado utilizando la metodología SOAM sobre los incidentes aéreos de pérdida de separación en vuelo de severidad A, se han obtenido conclusiones significativas relacionadas con los fallos de barreras, la implicación humana y las condiciones contextuales que influyen en ellos.

En primer lugar, se identificaron los principales fallos de barreras involucrados en estos incidentes, siendo los de “restricción”, “detección” y “control y recuperación” los más frecuentes. Es importante destacar que los fallos de “detección” y “control y recuperación” mostraron una relación fuerte en estos casos, debido al principio de sesgo de supervivencia. Sin embargo, no se puede generalizar esta relación debido al filtro preestablecido de los incidentes para seleccionar solamente aquellos de severidad A, trae consigo la definición que establece que se refiere a un incidente que tiene el potencial de causar una lesión grave o la pérdida de una aeronave, como referencia, se entiende que la diferencia entre un incidente serio y un accidente es solamente el resultado. Y, a diferencia de un incidente de severidad B, implica una instrucción errónea o inacción del ATC.

Al estudiar el impacto tanto de las condiciones activas (implicación humana) como de las condiciones pasivas (condiciones contextuales), se lograron identificar las rutas de fallo más frecuentes relacionadas con los fallos de barreras. Se observaron deficiencias en

las etapas de toma de decisiones, específicamente en “Interpretación”, “elección de objetivo” y “elección de plan de acción”. Estas etapas se vieron influenciadas principalmente por condiciones contextuales relacionadas con las condiciones en el lugar de trabajo.

Las condiciones de “presiones de tiempo” fueron identificadas como un factor relevante en estos fallos. El personal del ATC enfrenta altas demandas y restricciones de tiempo debido a la alta densidad de tráfico, la limitación del espacio aéreo y las condiciones meteorológicas desfavorables. Estas presiones pueden dificultar la capacidad de realizar un análisis exhaustivo de riesgos y priorizar adecuadamente las tareas.

Asimismo, las “malas comunicaciones” también jugaron un papel importante en los fallos de barreras. Las dificultades en la comunicación, las comunicaciones inestables o interrumpidas, y la saturación de las frecuencias de radio pueden afectar la capacidad de los profesionales del ATC o la tripulación de la aeronave para intercambiar información de manera efectiva y precisa.

Otra condición contextual relevante fue la “pobre correspondencia entre las instrucciones de trabajo y su ejecución”. Cuando existe una discrepancia entre las instrucciones proporcionadas al personal del ATC y la forma en que se ejecutan en la práctica, pueden producirse fallos en la toma de decisiones y en la implementación de acciones correctivas.

Además, se observó una presencia menor pero importante de condiciones contextuales relacionadas con las “limitaciones humanas del rendimiento”. Específicamente, se identificaron casos de conocimiento inexacto o incompleto por parte del personal del ATC sobre aspectos importantes, como el rendimiento de los aviones. Estas carencias estuvieron relacionadas con contextos en los que el ATC asumió de manera incorrecta características de las aeronaves como la velocidad de ascenso de aviones con el tren de aterrizaje desplegado o asignó posiciones de espera y aproximación que eran imposibles de cumplir debido a las capacidades de la aeronave.

El estudio de compatibilidad entre los modelos SOAM y ADREP ha revelado que, aunque no son una evolución natural uno del otro debido a sus enfoques diferentes, ambos modelos son compatibles y pueden complementarse mutuamente en la investigación de incidentes aéreos.

La utilización conjunta de ambos modelos permite obtener una visión más completa y holística de los incidentes aéreos. El modelo SOAM ofrece una comprensión más profunda de las causas y factores relacionados con el sistema, mientras que el modelo ADREP facilita el análisis estadístico y la identificación de tendencias en la seguridad aérea. Al utilizar ambos modelos en conjunto, se puede aprovechar al máximo la información proporcionada por cada uno y obtener una visión más completa y detallada de la seguridad aérea.

Por último, se pueden detallar los próximos pasos a tomar en trabajos futuros relacionados con el estudio realizado:

- **Factores Organizacionales:** Al haber realizado este estudio a través de una fuente de información secundaria (informes publicados de investigaciones ya realizadas con otro modelo), hay áreas de las que no se ha podido obtener información, como los factores organizacionales. Es importante en el futuro observar las conclusiones que se pueden obtener de este nivel y su influencia sobre los fallos de barreras.
- **Ampliación de la taxonomía:** Como se ha visto, en el análisis SOAM se encontraban fallos ligeramente diferentes que caían sobre la misma categoría, un posible futuro trabajo sería una ampliación de subcategorías similar a la taxonomía ADREP para permitir análisis estadísticos más detallados.
- **Implementación y Normalización:** En el presente, la aplicación de este modelo en la investigación de incidentes es demasiado costoso en términos de tiempo, esfuerzo y dinero. Queda como un trabajo futuro estudiar la optimización de su implementación.

## 7. MARCO SOCIO-ECONÓMICO

Es una parte crucial del trabajo de un ingeniero asegurarse de que la progresión y finalización de un proyecto se realice de la manera más eficiente. La eficiencia puede medirse de muchas formas, incluyendo el número total de horas dedicadas a cada tarea y objetivo, la inclusión o exclusión de licencias digitales solo de los programas esenciales y aprovechar al máximo las reuniones con el ingeniero senior.

Por esta razón, se eligió una tabulación presupuestaria. De esta manera, es más fácil planificar y monitorizar todos los costes asociados a este proyecto.

El presupuesto de este proyecto se divide en costes humanos y costes de equipo, que incluyen tanto los requisitos de hardware como de software del proyecto. De esta manera, la asignación de recursos se vuelve más evidente.

### 7.1. Costes Humanos

Esta sección de la evaluación presupuestaria se centra en el coste de mano de obra de los ingenieros asignados al proyecto. En este caso, se emplearían dos personas para esta tarea: un ingeniero junior y un ingeniero senior.

Se han elegido salarios medios acorde con el estado actual del mercado de ingeniería.

Tareas	Tiempo (horas)	Salario (€/hora)	Coste (€)
<b>Monitorización de Proyecto</b>	<b>120</b>	<b>25</b>	<b>3000</b>
Reuniones Periódicas	50	25	1250
Lectura y Corrección	40	25	1000
Investigación	30	25	750

TABLA 7.1. DESGLOSE DE COSTES: INGENIERO SENIOR



Tareas	Tiempo (horas)	Salario (€/hora)	Coste (€)
<b>Planificación</b>	<b>15</b>	<b>7</b>	<b>105</b>
Determinación de objetivos	7	7	49
Organización	8	7	56
<b>Investigación</b>	<b>70</b>	<b>7</b>	<b>490</b>
Identificación de referencias	10	7	70
Evolución de modelos	20	7	140
Modelo ADREP	10	7	70
Modelo SOAM	20	7	140
Contexto histórico	10	7	70
<b>Análisis y Estudio</b>	<b>80</b>	<b>7</b>	<b>560</b>
Análisis SOAM	30	7	210
Estudio y conclusiones SOAM	10	7	70
Análisis ADREP	20	7	140
Estudio y conclusiones ADREP	10	7	70
Comparación de Modelos	10	7	70
<b>Memoria</b>	<b>100</b>	<b>7</b>	<b>700</b>
Introducción & Estado del Arte	20	7	140
Descripción de Modelos	10	7	70
Metodología	20	7	140
Análisis de Resultados/Conclusiones	30	7	210
Apéndice/Trabajos Futuros	20	7	140

TABLA 7.2. DESGLOSE DE COSTES: INGENIERO JUNIOR

## 7.2. Coste de Hardware y Software

Concepto	Coste (€)
Coste de ordenador compatible	600
Licencia Windows 11	199
Licencia Microsoft Office	149

TABLA 7.3. DESGLOSE DE COSTE DE EQUIPO

### 7.3. Coste Total del Proyecto

Concepto	Coste (€)
<b>Costes Humanos</b>	4855
Horas Ingeniero Junior	1855
Horas Ingeniero Senior	3000
<b>Coste de Equipo</b>	948
<b>Coste Total</b>	<b>5803</b>

TABLA 7.4. DESGLOSE DE COSTE TOTAL

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Eurocontrol (2012). Systemic Occurrence Analysis Methodology (SOAM) Handbook.
- [2] EASA. (2020). Datos y análisis de seguridad aérea.
- [3] Reason, J. (2004). Human error and system design and management.
- [4] Reason, J. (1997). Managing the Risks of Organizational Accidents.
- [5] Shappell, S. A., & Wiegmann, D. A. (2001). Human error and general aviation accidents: A comprehensive, fine-grained analysis using HFACS.
- [6] Amalberti, R. (2001). The paradoxes of almost totally safe transportation systems.
- [7] Rasmussen, J. (1997). Risk management in a dynamic society: a modelling problem.
- [8] Checkland, P., & Scholes, J. (1990). Soft systems methodology in action.
- [9] Leveson, N. (2011). Engineering a safer world: Systems thinking applied to safety.
- [10] Perrow, C. (1984). Normal accidents: Living with high-risk technologies.
- [11] Hollnagel, E. (2004). Barriers and accident prevention.
- [12] Wienen, S. (1996). Building safety culture. Reliability Engineering & System Safety
- [13] Petersen, D., & Bea, R. (2011). Root Cause Analysis Handbook: A Guide to Efficient and Effective Incident Investigation.
- [14] Heinrich, H. W. (1931). Industrial accident prevention: a scientific approach.
- [15] Stamatis, D. H. (2019). Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution.
- [16] Lawley, M., & Tomlinson, G. (2000). HAZOP and HAZAN: Identifying and assessing process industry hazards. Institution of Chemical Engineers.
- [17] Vesely, W. E., Goldberg, F. F., Roberts, N. H., & Haasl, D. F. (1981). Fault tree handbook. US Nuclear Regulatory Commission.
- [18] IAEA-CSNI
- [19] MIL-STD-1629A
- [20] Kirwan, B. (1994). A guide to practical human reliability assessment.
- [21] Reason, J. (1990). Human Error. Cambridge University Press.
- [22] NASA (2018). Human Error Analysis Tool (HEAT).
- [23] Rasmussen, J. (1986). Information processing and human-machine interaction: An approach to cognitive engineering.
- [24] Institute of Nuclear Power Operations (INPO) (2001). Root Cause Analysis Hand-

book: A Guide to Effective Incident Investigation.

[25] Salminen, S. (1997). ATHEANA—An analysis tool for occupational health and safety work.

[26] Wiegmann, D. A., & Shappell, S. A. (2003). A human error approach to aviation accident analysis: The human factors analysis and classification system.

[27] Dekker, S. (2006). The Field Guide to Understanding Human Error.

[28] Wienen, A. W. (1997). Review: Normal Accidents. *Journal of Policy Analysis and Management*

[29] Woods, D. D., & Cook, R. I. (1999). Perspectives on Human Error: Hindsight Biases and Local Rationality.

[30] International Civil Aviation Organization (ICAO). (2013). Manual on the Investigation of Air Navigation Incidents.

[31] European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL). (2005). ESARR 2 - ATM Safety Regulation.

[32] International Civil Aviation Organization (ICAO). (2010). Annex 13 to the Convention on International Civil Aviation – Aircraft Accident and Incident Investigation.

[33] Gibbons, A. M., & Higgins, A. (2018). Evaluating the Systemic Occurrence Analysis Methodology (SOAM): Perspectives from Industry and Regulators.

[34] Eurocontrol. (2019). SOAM - Systemic Occurrence Analysis Methodology.

[35] International Civil Aviation Organization. (2014). Accident/Incident Data Reporting (ADREP) Handbook.

[36] European Aviation Safety Agency (EASA). (2010). ESARR 2 Guidance Document EAM2/GUI1

[37] Rasmussen, J. (1982). Human errors: A taxonomy for describing human malfunction in industrial installations.

[38] Hollnagel, E. (2000). Human reliability analysis: Context and control.

[39] OACI. (2017). Manual de Análisis y Presentación de Datos de Incidentes de Aviación (ADREP).

[40] Embrey, D. E. (1994). Human error analysis techniques for nuclear power plant design.

[41] E.F.Codd (junio de 1970). A Relational Model of Data for Large Shared Databanks.

[42] C.J.Date (1994). An Introduction to Database Systems.

## **9. APÉNDICE**

### **9.1. Hoja de Cálculo**

Ver el archivo excel adjunto.