



UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Regulación y alternativas al halón
como extintor de incendios en
aeronaves**

Carlos Galán Morales

Curso 2022-2023

Título: Regulación y alternativas al halón como extintor de incendios en aeronaves

Autor: Carlos Galán Morales

Tutor: Miguel Ángel Castillo Acero

Titulación: Máster en Ingeniería Aeronáutica

Curso: 2022/2023

RESUMEN

La temática del proyecto se basa en torno a un compuesto químico extintor de incendios muy utilizado en aeronáutica, conocido por el nombre de halón. Este compuesto es muy eficaz y útil, sobre todo en zonas a las que no se tiene acceso en vuelo, como la bodega de carga. Permite almacenar una cantidad suficiente para extinguir un incendio en una zona amplia, ocupando un espacio reducido. El inconveniente de este compuesto es el daño que provoca a la capa de ozono atmosférica. Al ser tan contaminante, hace unos años se publicó el Protocolo de Montreal para regular cómo ir reduciendo su utilización de manera progresiva, dando a los operadores unos tiempos límite para su sustitución por otros agentes extintores. Actualmente, se está sustituyendo por otros compuestos.

Además, en este estudio se analiza la efectividad de elementos que son alternativos al halón para su uso como extintor de fuego, comprobando que éstos no son tan efectivos, pero sí menos contaminantes. En las conclusiones se evidenciará que, actualmente, no se ha conseguido ningún compuesto alternativo con unas propiedades tan buenas como las del halón, pero sí se consiguen grandes aproximaciones si se comparan con agentes extintores no aeronáuticos. En este proyecto se analizan dichas alternativas llegando a la conclusión que el HFC 227EA es una de las mejores soluciones para la sustitución.

Palabras clave: Halón, bodega de carga, EASA, Clean Aviation.

ABSTRACT

The topic of the project is based around a fire extinguishing chemical compound widely used in aeronautics, known by the name halon. This agent is very effective and useful, especially in areas that are not accessible during the flight, such as the cargo hold. It allows to store a sufficient quantity to extinguish a fire in a wide area, occupying a small space. The drawback of this compound is the damage it causes to the atmospheric ozone layer. As it is so polluting, the Montreal Protocol was published a few years ago to regulate how to progressively reduce its use, giving operators certain time limits for its substitution by other extinguishing agents. Currently, it is being replaced by other compounds.

In addition, this study analyzes the effectiveness of elements that are alternatives to halon for use as a fire extinguisher, verifying that they are not as effective, but less polluting. In the conclusions it will be evident that, currently, no alternative compound has been achieved with properties as good as those of halon, but great approximations are achieved if compared with non-aeronautical extinguishing agents. In this project, these alternatives are analyzed, reaching the conclusion that HFC 227EA is one of the best solutions for substitution.

Agradecimientos

Agradezco a mi tutor, Miguel Ángel Castillo, el interés con este proyecto y la rápida respuesta en momentos de incertidumbre. Sin su ayuda y conocimientos no hubiera sido posible realizar este proyecto.

Agradezco a mis padres, que me enseñaron a confiar en mis decisiones y que, con esfuerzo y constancia, se puede conseguir todo lo que uno se proponga.

A mis compañeros de clase, con los que he compartido innumerables momentos y a los que considero mis amigos. En especial a David, que cambió mi vida a nivel profesional y le estoy muy agradecido por ello.

A mis amigos y a todos mis familiares por todo su apoyo y por estar siempre a mi lado.

Índice de contenidos

RESUMEN 5

ABSTRACT 6

Chapter 1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 ¿Cómo se produce un incendio?.....	13
1.2 Formas de transferencia de calor.....	14
1.3 Formas básicas de extinción.....	16
1.4 Clases de fuegos	16
1.5 Qué es el halón y para qué se utiliza.....	17
1.6 Alternativas convencionales (no aeronáuticas) al halón como agente extintor.....	19
1.6.1 Agua	19
1.6.2 Dióxido de carbono	19
1.6.3 Polvo químico seco	20
1.6.4 Espuma formadora de película acuosa (AFFF).....	21
1.7 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	22
1.8 Daño medioambiental.....	22
Chapter 2. UTILIZACIÓN Y REGULACIÓN ACTUAL DEL HALÓN EN AVIONES... 27	
2.1 Utilización actual del halón en aeronáutica.....	27
2.2 Protocolo de Montreal.....	27
2.2.1 Industria en general.....	28
2.2.2 Aeronáutica en particular	30
2.3 Regulación Europea.....	31
2.3.1 Normas de la Unión Europea en el contexto de la aviación	33
2.3.2 Ejemplos: Posibles situaciones.....	34
2.4 FAA	40

Chapter 3. ESTUDIO Y ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.....	41
3.1 Metodología de estudio	46
3.2 Resultados y análisis.....	57
Chapter 4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	76
REFERENCIAS	78

Figuras

Figura 1: Triángulo de fuego [2]	13
Figura 2: Propagación del calor por conducción [3].....	14
Figura 3: Propagación del calor por convección [1].....	15
Figura 4: Propagación del calor por radiación [4].....	15
Figura 5: Clases de fuego [5].....	17
Figura 6: Efecto de los CFC sobre el ozono estratosférico [9].....	24
Figura 7: Agujero de la capa de ozono [8].....	25
Figura 8: Calendario de reducción de la producción y consumo de halones [12].....	28
Figura 9: Solicitud de cambio del certificado de tipo después de la “cut-off date” [16].	35
Figura 10: Solicitud de un nuevo certificado de tipo antes de la “cut-off date” [16].	35
Figura 11: Solicitud de un nuevo certificado de tipo después de la “cut-off date” [16].	36
Figura 12: Extensión de la solicitud de certificado de tipo después de la “cut-off date” [16].	36
Figura 13: Producto extranjero, aplicación a la autoridad certificadora y autoridad validadora antes de la “cut-off date” [16].	37
Figura 14: Producto extranjero, aplicación a la autoridad certificadora antes de la “cut-off date” y a la autoridad validadora después de la “cut-off date” [16].	37
Figura 15: Producto extranjero, aplicación a la autoridad certificadora y autoridad validadora después de la “cut-off date” [16].	38
Figura 16: Comparativa entre el estándar OACI y el de la UE [16].	39
Figura 16: Fuselaje de aeronave para pruebas de extinción de incendios [20].	43
Figura 17: Fuselaje delantero de Airbus A310 para pruebas de presión [20].	46
Figura 18: Laboratorio para pruebas de presión con cabina de A310 [21].	48
Figura 19: Esquema de cámara de pruebas de fuga de ambiente extintor utilizando IG-541 [23].	51
Figura 21: Comparativa de cilindros y espacio [36].	69
Figura 22: Extintor del baño del Boeing B737-NG [39].	75

Tablas

Tabla 1: Usos de halones en aeronaves con “cut-off date” y “end date” [16].....	33
Tabla 2: Fórmula y nombre comercial de los agentes extintores.	58
Tabla 3: Capacidad de extinción de incendios de los agentes extintores.....	59
Tabla 4: Toxicidad de los agentes extintores.....	61
Tabla 5: Residuos, visibilidad y conducción eléctrica de los agentes extintores.	62
Tabla 6: Parámetros de contaminación atmosférica de los agentes extintores.	63
Tabla 7: Propiedades químicas de los agentes extintores.	65
Tabla 8: Resultados de masa y volumen de los agentes extintores, necesarios para apagar un incendio.....	67
Tabla 9: Masa y volumen de los agentes extintores relativos al Halón 1301.....	68
Tabla 10: Agentes descartados como sustitutos al halón.....	71
Tabla 11: Comparativa final de agentes extintores potenciales.	73

Chapter 1. INTRODUCCIÓN

1.1 ¿Cómo se produce un incendio?

Para que se produzca un incendio se tiene que dar una reacción de combustión, que es una reacción química exotérmica en la que un combustible y un comburente, generalmente oxígeno, se mezclan desprendiendo calor.

Para que se produzca este fenómeno tiene que existir un combustible (cualquier elemento con capacidad para arder), un comburente (generalmente oxígeno en la atmósfera) y una fuente de calor o una chispa que active la reacción de combustión, como se esquematiza en la siguiente figura:



Figura 1: Triángulo de fuego [2]

Esta energía de activación, o aporte de calor, necesaria para provocar un incendio, puede provenir de multitud de fuentes. Principalmente, estas fuentes serán de naturaleza química, eléctrica o mecánica.

El calor a consecuencia de una reacción química puede producirse por disolución, combustión, calor de descomposición o calentamiento espontáneo.

La electricidad puede generar calor a partir de resistencias, a partir de electricidad estática, calentamiento por inducción, calentamiento dieléctrico, calentamiento producido por corrientes de fuga o calor como consecuencia de un arco eléctrico.

A nivel mecánico, se pueden originar chispas y calor a partir de la fricción o la compresión de objetos con movimiento relativo entre ellos.

1.2 Formas de transferencia de calor

Independientemente de la fuente que genere el calor, este se puede desplazar a lo largo de un objeto o por el aire. Esto se produce por el intercambio de energía entre partes de un objeto o masas de aire a distinta temperatura. Esto puede ocasionar la propagación de un incendio o incluso la generación de uno nuevo. Las tres formas de propagación del calor son: conducción, convección y radiación.

- Conducción: El calentamiento de una zona de un sólido provoca un mayor movimiento de las partículas en la zona calentada y, estas, le trasladan esta energía a las que tienen al lado. Esto provoca la transferencia de calor por el objeto.

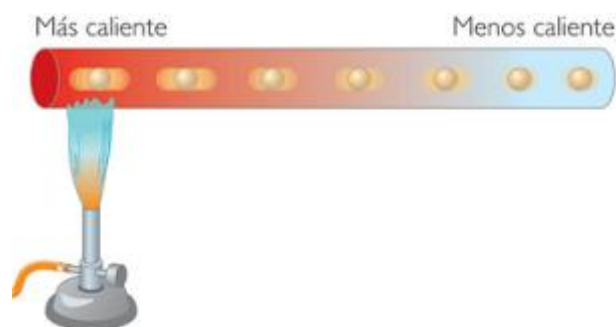


Figura 2: Propagación del calor por conducción [3]

- Convección: Este fenómeno de transferencia de calor se produce por una diferencia de densidades entre el aire frío y caliente. La masa de aire con una mayor temperatura es menos densa, ya que el volumen aumenta para la

misma masa de aire, y tiene a posicionarse encima de la masa de aire frío. Por lo tanto, el aire caliente sube y, el frío, baja.

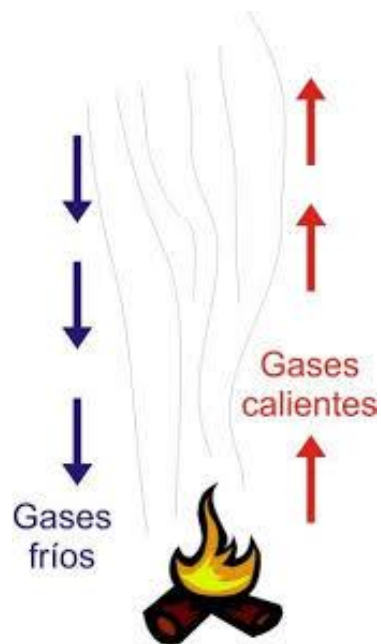


Figura 3: Propagación del calor por convección [1]

- Radiación: Se produce a partir de ondas electromagnéticas que se propagan en todas direcciones desde la fuente de calor. Se produce como resultado del movimiento en el espacio, de forma aleatoria, de protones y electrones cargados.

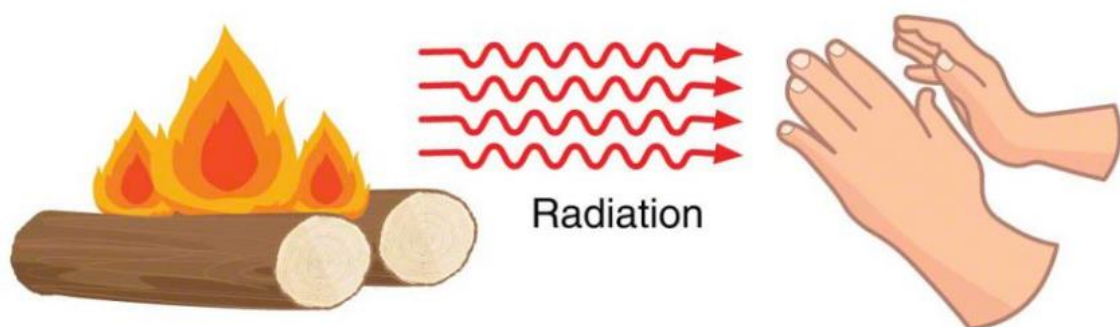


Figura 4: Propagación del calor por radiación [4]

1.3 Formas básicas de extinción

Como se ha visto en el triángulo de fuego, los tres elementos que son necesarios para que se produzca un fuego son el combustible, el comburente y la energía de activación. Si se retira de la ecuación uno de los tres elementos, se conseguiría la extinción de dicho fuego.

- Eliminación del combustible: La forma más eficaz, pero generalmente, la más compleja, es la eliminación del combustible. Es necesario que la zona tenga la menor cantidad de residuos posible que pudieran actuar como combustible.
- Sofocación (Eliminación del comburente): Proceso en el que se retira el oxígeno de la combustión. Se utilizan métodos que separan el oxígeno de la zona incendiada para que no pueda tener lugar la reacción.
- Refrigeración (Eliminación del calor): Consiste en la aplicación de agentes extintores con capacidad de absorción de calor. Esto provoca la ralentización de la reacción de combustión hasta el punto de detenerse.
- Inhibición: Hay una cuarta forma de extinción que consiste en eliminar la reacción en cadena. En este caso, el agente extintor reacciona con la combustión produciendo una reacción endotérmica que detiene la reacción en cadena.

1.4 Clases de fuegos

Dependiendo del material combustible, se hace distinción de cinco tipos de fuegos. Estas cinco clases se identifican mediante una letra, un color y un símbolo característicos.

- Clase A: Fuegos en sólidos inflamables como madera, cartón, telas, neumáticos, etc.
- Clase B: Incendio sobre líquidos inflamables como gasolina, alcohol petróleo, asfalto, plásticos, etc. Dentro de esta clase, aquellos líquidos que se pueden mezclar o diluir en agua reciben el nombre de polares y, aquellos que no tienen esta propiedad, no polares. Esta clase también es aplicable a gases inflamables como el gas natural, hidrógeno, butano, metano, etc.

- Clase C: Fuego de sistemas eléctricos bajo tensión. No se puede utilizar un agente extintor que sea buen conductor de la electricidad.
- Clase D: Se desarrollan en metales combustibles como magnesio, sodio, potasio, etc.
- Clase K (en algunos casos se denomina clase F): En esta clase se incluyen los aceites de cocina. Estos aceites no tienen el mismo comportamiento que los que se incluyen en la clase B, por lo tanto, tienen una clase propia.

TIPOS DE FUEGO		
		Madera, papel, cartón, tela, plástico etc.
		Pintura, gasolina, petróleo, etc.
		Equipos o instalaciones eléctricas.
		Sodio, potasio, magnesio, aluminio, titanio, etc.
		Grasas y aceites de cocina.

Figura 5: Clases de fuego [5]

1.5 Qué es el halón y para qué se utiliza

El halón (contracción del nombre en inglés “halogenated hydrocarbon”) es un gas utilizado, principalmente, como extintor de incendios. Estos compuestos son hidrocarburos halogenados en los que se sustituyen átomos por elementos halógenos como el cloro, flúor, bromo o yodo, productos químicos capaces de extinguir el fuego capturando los radicales libres generados en la reacción de combustión.

Hace unos años se determinó, mediante varios estudios, que el halón produce daños en la capa de ozono atmosférica. Esto provocó la retirada de este compuesto del mercado exceptuando algunas situaciones críticas, como es el caso de la aeronáutica, ya que es uno de los compuestos más eficaces en el combate contra incendios.

Actualmente, está prohibida la fabricación de estos compuestos debido al deterioro que provocan en la capa de ozono. Aún se pueden encontrar en uso algunos dispositivos apagafuegos que utilizan el halón, pero se están retirando de manera progresiva del servicio. Estos se están sustituyendo por otros compuestos similares que no son dañinos ecológicamente, como los halotrones o halocleanes.

Además, el halón posee características de alto valor en la extinción de incendios como la baja toxicidad y la capacidad de no dejar residuos ni dañar equipos eléctricos en los que se aplica.

Los halogenados más utilizados eran el halón 1301 (trifluor-bromo-metano) y el halón 1211 (difluor-cloro-bromo-metano).

Principales ventajas del halón como método extintor:

- Aptos para diferentes tipos de incendios (clases A, B y C).
- Gran potencial extintor.
- Pequeño volumen de almacenamiento.
- Baja toxicidad, sobre todo en los nuevos sustitutos.
- No dejan residuos.
- Buena visibilidad.
- No dañan a los sistemas electrónicos.

Principales inconvenientes y precauciones a tener en cuenta:

- Dañan la capa de ozono.
- Alto coste.
- Algunos halones originales son tóxicos.

1.6 Alternativas convencionales (no aeronáuticas) al halón como agente extintor

En el curso “Protección contra incendios. Seguridad, prevención y extinción” [1], se comentan los siguientes compuestos como alternativa al halón como agente extintor en usos generales, es decir, usos no específicamente aeronáuticos.

1.6.1 Agua

Este líquido tiene una gran capacidad para absorber calor. El vapor producido al calentarse ocupa una gran cantidad de volumen (por cada litro de agua se genera alrededor de 1700 litros de vapor) que, al ser más pesado que el aire, lo desplaza sofocando el fuego.

El agua es un buen agente extintor para fuegos de tipo A, algunos de tipo B e ineficaz y peligroso para fuegos de tipo C y D.

Ventajas:

- Alta absorción de calor.
- El gran volumen de vapor producido desplaza al aire.

Inconvenientes:

- Es un buen conductor de la electricidad.
- Se produce una reacción si entra en contacto con algunos metales (magnesio, aluminio...) liberando gases inflamables.
- Debido a su densidad, no se puede utilizar para fuego en líquidos menos pesados.

1.6.2 Dióxido de carbono

Este gas tiene la capacidad de desplazar al aire ya que tiene una densidad superior, por lo tanto, su efecto extintor principal es el de sofocación.

Ventajas:

- Es un gas incombustible.
- Al tener una densidad mayor que el aire (1.5 veces), cae sobre el combustible desplazando la masa de aire hacia arriba.
- No moja, no provoca corrosión y no deja residuos.
- No es un buen conductor eléctrico.
- No produce reacción química con la mayoría de sustancias.

Inconvenientes:

- No es una buena alternativa para lugares abiertos o muy ventilados.
- No se puede utilizar en materiales con contenido en oxígeno, ya que sofoca el fuego desplazando el aire.
- Provoca asfixia debido al desplazamiento del aire.
- No es la mejor opción para fuegos de clase A (lo apaga, pero deja brasas que pueden volver a arder) y D (no apaga el fuego en algunos metales y produce reacción con otros).

1.6.3 Polvo químico seco

Existen dos tipos de polvo químico seco utilizados en la actualidad. Uno biclase utilizado para incendios de clase B y C, debido a sus características especiales, y otro triclase, útil para las clases A, B y C. Este último, es el tipo de polvo químico seco más utilizado debido a su efectividad en gran cantidad de situaciones. Actúan inhibiendo la reacción química en cadena.

Ventajas:

- La capacidad de reacción con otros materiales es baja.
- No es toxico.

Inconvenientes:

- Produce corrosión, se desaconseja en equipos de alta complejidad.
- Necesita presurización.
- Puede dificultar la visión y la respiración.
- Produce reacción química al entrar en contacto con la espuma.
- Para fuegos de clase C, se puede utilizar hasta los 1600°C. A temperaturas más altas, se funde y adquiere la capacidad de conducir la electricidad.

1.6.4 Espuma formadora de película acuosa (AFFF)

Este agente extintor está formado por una masa de burbujas con gas en su interior, formadas a partir de soluciones acuosas de agentes espumantes de distintas fórmulas. Al tener una densidad menor que los líquidos inflamables en los que se aplica, cubre la superficie instalando una película de material acuoso que provoca el desplazamiento del aire previniendo la combustión, ya que impide que se desprendan vapores.

Ventajas:

- Buen aislamiento del combustible con película acuosa.
- Muy buen agente extintor para fuegos de líquidos no polares.
- Se puede usar de forma preventiva, creando esta capa acuosa antes de que se produzca el incendio.
- Útil para clases de incendio A y B.

Inconvenientes:

- No se puede utilizar en líquidos polares ya que, estos, rompen la espuma.
- Es un buen conductor de la electricidad, por lo que está descartado para incendios de clase C.

1.7 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son una serie de metas establecidas por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) con el fin de llegar a un futuro sostenible a nivel mundial. Incluye desafíos como pobreza, desigualdad, degradación ambiental, clima prosperidad, justicia y paz. Para el bienestar global, es importante que se cumpla con todos los objetivos para el año 2030.

Todos estos objetivos presentan una serie de metas establecidas para poder cumplir con ellos antes del año 2030. A continuación, se va a desarrollar únicamente el *ODS 13. Acción por el clima*, ya que es el único relativo al tema de este estudio.

La ONU establece una serie de metas para el ODS 13, [10], como la necesidad de adaptarse a los riesgos que provoca el cambio en el clima, la inclusión de políticas o planes estatales referidos a este tema o la concienciación y educación sobre el cambio climático y como evitarlo y adaptarse a él.

Como principal medida, el 12 de diciembre de 2015, 196 países firmaron el Acuerdo de París. Este es un tratado internacional legalmente vinculante sobre el cambio climático, cuyo propósito es la limitación del incremento anual del calentamiento global por debajo de 2 grados Celsius en la temperatura atmosférica media a nivel de superficie terrestre, comparado con niveles preindustriales.

El objetivo de las Partes firmantes es alcanzar el máximo de emisiones de gases nocivos a la atmosfera lo antes posible de manera que se logre la neutralidad climática mundial y poder conseguir este objetivo de temperatura a largo plazo.

El Acuerdo de París ha supuesto un hito en lo que refiere a acuerdos entre países ya que los une con un objetivo común, el de emprender grandes esfuerzos para luchar contra el cambio climático y adaptarse a sus efectos.

1.8 Daño medioambiental

La capa de ozono es una de las capas que forman la atmosfera terrestre. Su función es la de evitar que los rayos solares y ultravioleta lleguen a la superficie afectando a los seres vivos. Un aumento a la exposición de estos rayos puede producir daños en

plantas y ecosistemas marinos, así como un incremento del riesgo de cáncer de piel y cataratas [6]. Esta capa presenta las siguientes características básicas:

- Se encuentra a una altitud de entre los 15 y los 50 km.
- Retiene entre el 97 y 99% de la radiación ultravioleta de alta frecuencia.
- El 90% de ozono de la atmosfera se encuentra en esta capa.

Se hizo una entrevista a Sherwood Rowland, premio Nobel de química en 1995, que fue una de las personas que descubrió el daño que producen los gases clorofluorocarbonados a la atmósfera [7]. En ella se narra que, en el año 1974, dos químicos de la Universidad de California en la ciudad de Irvine (EE. UU.), Mario Molina y Sherwood Rowland, escribieron un artículo en la revista Nature hablando de las amenazas que provocan los gases clorofluorocarbonos (CFC) sobre la capa de ozono: "Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone". Estos gases se producían a grandes cantidades en esa época, a razón de un millón de toneladas al año, ya que se utilizaban en la industria sin conocimiento de su afectación a la atmósfera.

Se demostró que los gases clorofluorocarbonos (CFC) no reaccionan por debajo de los 29 km de altitud, por tanto, no producen ningún daño. Sin embargo, a partir de esta altitud, los rayos ultravioleta provocan la descomposición molecular de estos gases y creando átomos de cloro y otros fragmentos residuales. Estos átomos se combinan con el oxígeno de la capa de ozono formando oxido de cloro. Esta nueva molécula es la que presenta el principal problema, ya que tiene un electrón sin pareja, lo que provoca la búsqueda de un compañero. Debido a esto tiene lugar una reacción en cadena que elimina cien mil moléculas de ozono por cada átomo de cloro.

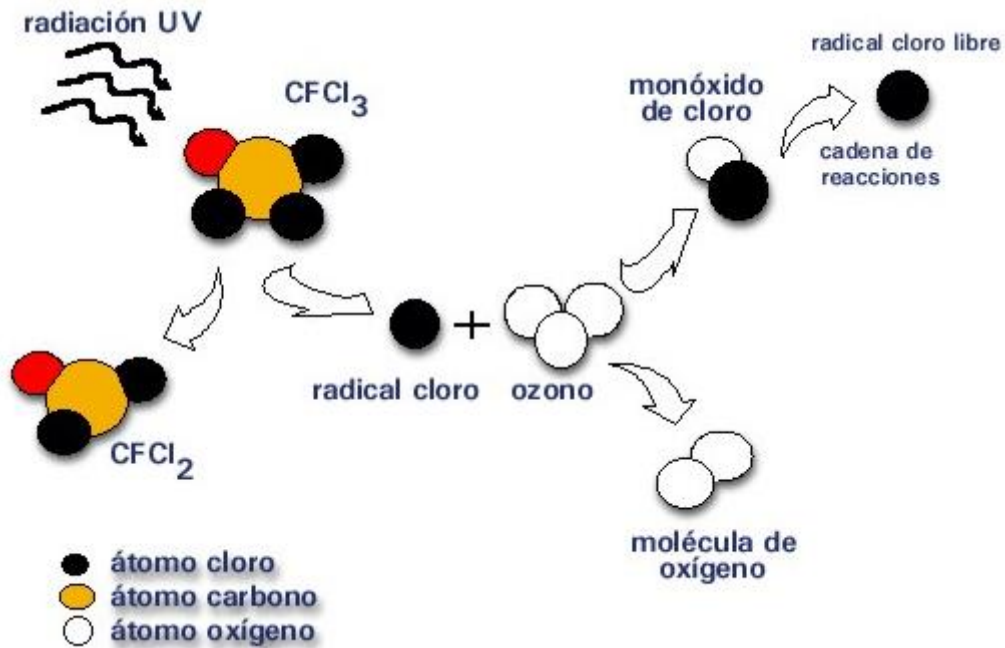


Figura 6: Efecto de los CFC sobre el ozono estratosférico [9]

Después de este análisis, los químicos Molina y Rowland llegaron a la conclusión de que la atmósfera tiene una capacidad finita de absorción de átomos de cloro. Además, en el año 1985, un equipo de científicos en la Antártida descubrió un “agujero” en la capa de ozono, relacionado con la emisión de CFC.

Lo que se conoce comúnmente como agujero de la capa de ozono no es más que una zona de la estratosfera con baja concentración de ozono con una repetición anual entre los meses de agosto y octubre. En la primavera del hemisferio sur se incrementa la luz del sol recibida y esto provoca la liberación de cloro en las nubes ubicada en esta zona de la atmósfera.

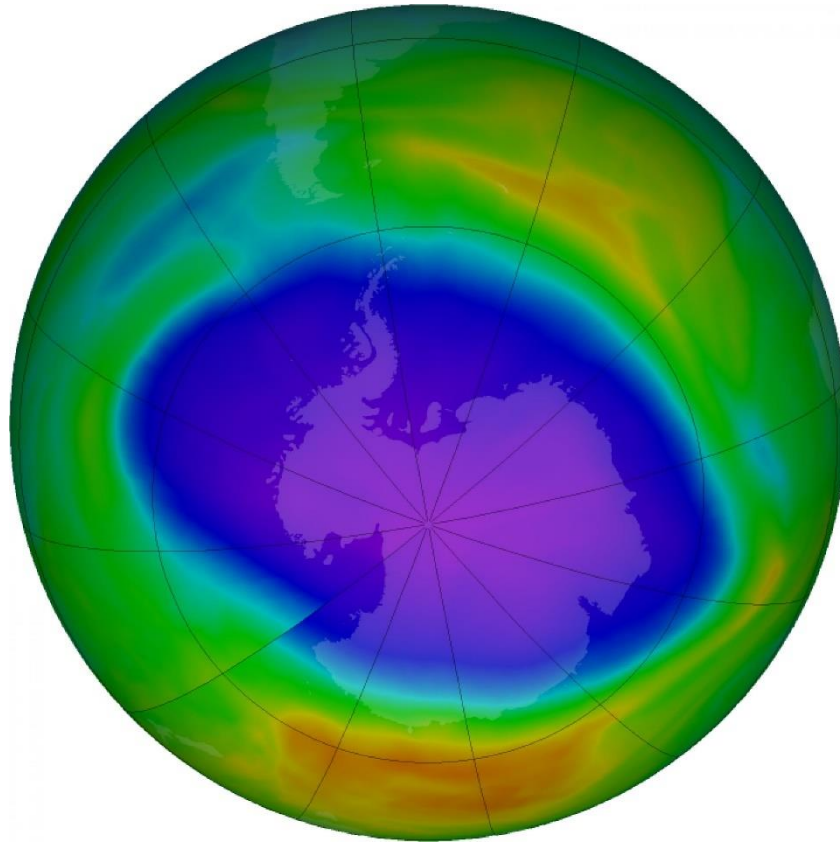


Figura 7: Agujero de la capa de ozono [8]

A raíz de estos estudios publicados, se reconoció la emisión de CFC y otros compuestos por parte de los seres humanos estaba perjudicando a la atmósfera. Por lo tanto, en el año 1987, se firmó el Protocolo de Montreal (dentro del Convenio de Viena), ratificado por los estados miembros de la ONU, que pretende reducir al máximo la afectación atmosférica como consecuencia de la emisión de gases dañinos.

Como consecuencia de las medidas impuestas para reducir esta emisión de gases, 30 años después de la firma del Protocolo de Montreal, se ha probado que el ozono se está recuperando en la zona antártica. Entre 2005 y 2019 la recuperación fue de un 20%. Se prevé que entre 2030 y 2040 se recupere completamente en el hemisferio norte, en la década de 2050 en el hemisferio sur y, alrededor de 2060 en las regiones polares, ya que son las zonas donde más se concentra esta disminución de ozono.

El halón, que es el principal extintor de incendios utilizado en aeronáutica, se prohíbe de manera general para poder cumplir con el ODS 13 debido a su efecto contaminante para la capa de ozono. Esta prohibición presenta algunas excepciones para casos críticos, como se detalla en el siguiente capítulo.

Chapter 2. UTILIZACIÓN Y REGULACIÓN ACTUAL DEL HALÓN EN AVIONES

2.1 Utilización actual del halón en aeronáutica

En aviones grandes, tanto de pasajeros o de carga, se utiliza el halón en todos los compartimentos y sistemas que requieren de un equipo de extinción de incendios. Estos son los motores, el APU, los compartimentos de carga, los lavabos y extintores de mano para incendios visibles, que puedan ser actuados por la tripulación [11]. En esta referencia también se pueden encontrar los sistemas de alerta de incendio que recibe el piloto y la estructura de los sistemas dedicados a la extinción, así como sus controles de activación. No se va a entrar en detalle ya que se desvía del propósito principal del proyecto.

2.2 Protocolo de Montreal

El protocolo de Montreal, [12], es una fuente de referencia fundamental para entender la utilización y regulación actual de los halones en todos los sectores. Se divide en Artículos y Decisiones, tomadas por las Partes con el objetivo de eliminar, o reducir en gran medida, la utilización de sustancias que agotan la capa de ozono.

En primer lugar, se va a tratar de una forma general en la industria y, posteriormente, de forma concreta en aeronáutica.

2.2.1 Industria en general

En el Artículo 2B se definen los tiempos en los que empiezan a ser efectivas las restricciones en cuanto a consumo y producción, con el objetivo de reducirlo de manera progresiva hasta la eliminación de su uso.

Los halones a los que hace referencia el Protocolo de Montreal son halon-1211, halon-1301 y halon-2402, y se muestra el potencial de agotamiento del ozono de cada una de estas sustancias.

Sustancia	Potencial de agotamiento del ozono (aproximado)
(halon-1211) CF_2BrCl	3
(halon-1301) CF_3Br	10
(halon-2402) $C_2F_4Br_2$	6

Tabla 1: Halones controlados por el Protocolo de Montreal, así como su potencial de agotamiento del ozono (elaboración propia a partir de los datos del Protocolo de Montreal)

En función de si las Partes pertenecientes al Protocolo operan al amparo del Artículo 5, el calendario de reducción de la producción y consumo de halones es el siguiente:

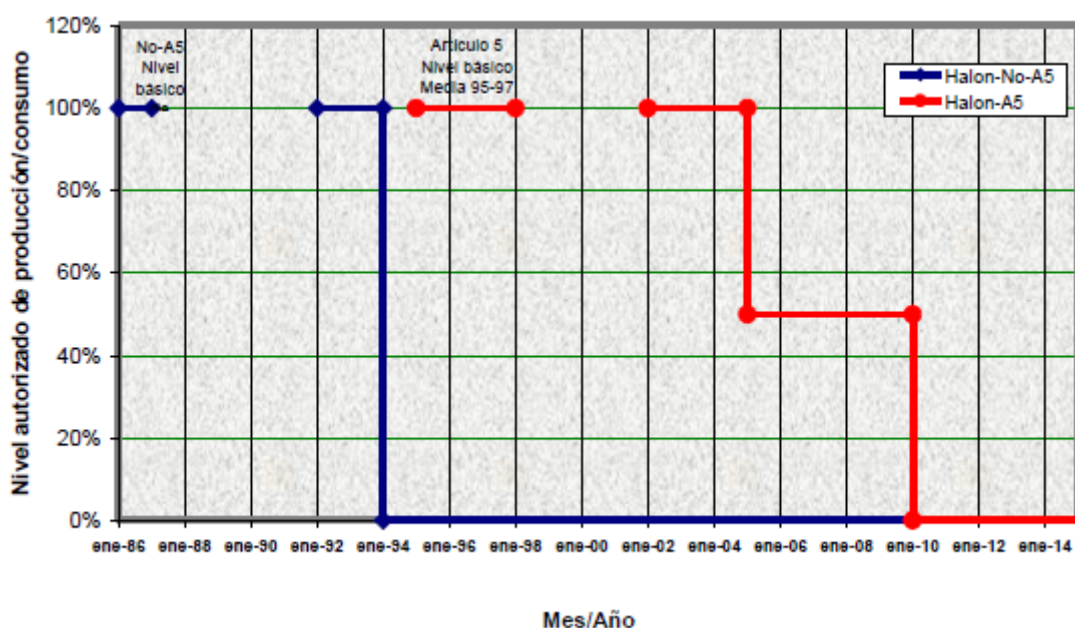


Figura 8: Calendario de reducción de la producción y consumo de halones [12]

Como se observa en la Figura 8, a partir de enero de 2010 se debía tener un consumo y producción nulo de este tipo de sustancias, en cualquier caso. Como veremos posteriormente, existen excepciones para usos críticos, ya que el sector aeronáutico es una de ellas.

En la Decisión IV/26, se trata la gestión de existencias internacionales de halones reciclados. Se pide a las Partes que se utilicen halones reciclados en la medida de lo posible y que se reduzca al mínimo su utilización en aplicaciones no esenciales.

En la Decisión V/15, se alienta a las Partes a notificar la información relativa aplicable a la gestión internacional de bancos de halones.

En la Decisión XIV/6, se definen las tecnologías que deben ser utilizadas para la destrucción de sustancias que dañan la capa de ozono. En el caso de los halones, se debe aplicar arco de plasma en atmósfera de argón. El retiro de sistemas de halones no esenciales se explica en la Decisión IX/21.

En la Decisión VII/31, se trata la situación de los halones reciclados desde el punto de vista del control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación. Estos movimientos solo deben tener lugar si el país receptor dispone de instalaciones de reciclados aprobadas.

Los criterios para evaluar la utilización de sustancias como esencial se definen en la Decisión IV/25. Más concretamente, para los usos esenciales de halones se hace referencia a la Decisión V/14. Una sustancia se considera “esencial” si es necesaria para la salud y seguridad o esencial para el funcionamiento de la sociedad, o también si no hay otros productos sustitutos técnica y económicamente viables que sean aceptables para el medio ambiente y la salud. Además, es obligatorio que las Partes comuniquen la utilización de usos esenciales en un plazo concreto, como se explica en la Decisión V/18.

En la Decisión X/7, se definen las estrategias de gestión de los halones, llegando a la conclusión, en el año 1998, de que todos los usos no críticos de los halones 1211 y 1301 pueden eliminarse.

En la referencia [13] se dan algunas recomendaciones técnicas para la evaluación y control de proyectos que traten de eliminar gradualmente las sustancias que agotan la capa de ozono, más concretamente, del halón. Explica el método para calcular la cantidad de sustancia que se está consumiendo por una empresa o un país y da

alternativas menos contaminantes para la sustitución, aportando ventajas e inconvenientes.

En este proyecto no se entra en detalle a comentar las decisiones ejecutivas del Comité ya que no es relevante en el estudio. Si se desea más información sobre este tema, se puede consultar la referencia [14].

2.2.2 Aeronáutica en particular

La Decisión XV/11 define un plan de acción para modificar las disposiciones reglamentarias que exigen el uso de halones en los nuevos fuselajes. Dado que se siguen utilizando los halones como extintores de incendios en aeronáutica, se autoriza a la Secretaría del Ozono y al Grupo de Evaluación Tecnológica y Económica a debatir con la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) para elaborar un plan de acción que permita reducir el uso de halones sin afectar a la salud o la seguridad de los pasajeros.

Tras la colaboración de estas entidades se solicitó a la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) que considerara obligar a que, en 2011, se debían sustituir los halones en lavabos, extintores portátiles, motores y generadores auxiliares en las aeronaves de diseño nuevo. Además, en este mismo año, se debería sustituir los halones por algún compuesto alternativo en los lavabos de aeronaves de fabricación nueva y, en 2014, se sustituiría en los extintores portátiles en aeronaves de fabricación nueva, como se expresa en la Decisión XXI/7.

Posteriormente a la firma de esta Decisión, OACI publicó la resolución A37-9 sobre la sustitución de halones, en la que se trata la urgente necesidad de seguir trabajando en la investigación para dar con nuevas sustancias alternativas al halón en aviación civil, sobre todo para la extinción de incendios de bodega de carga, motores y grupos auxiliares de energía, así como continuar en la mejora de alternativas para los extintores portátiles de cabina. Tras esta resolución, el Protocolo de Montreal propone, bajo la Decisión XXII/11, la sustitución de halones:

- en lavabos de aeronaves fabricadas después de 2011,
- en extintores portátiles de aeronaves fabricadas después de 2016,

- en motores y grupos auxiliares de energía de aeronaves cuya certificación de tipo se solicite después de 2014.

En la Decisión XXVI/7, se comenta la disponibilidad de halones recuperados, reciclados y regenerados. La producción mundial de halones para usos generales se eliminó en 2009, pero como en aeronáutica y otros campos es necesaria la continuación de su uso, se solicita que, en la medida de lo posible se utilicen halones reciclados, con el objetivo de evitar la fabricación de cantidades innecesarias. Además, se resume que, en las resoluciones A37-9 y A38-9, OACI acepta las fechas de sustitución de halones propuestas, dejando la sustitución del halón en la bodega de carga para más adelante, ya que es uno de los compartimentos más críticos.

La disponibilidad futura de halones y sus alternativas se trata en las Decisiones XXIX/8 y XXX/7, en las que se insta a la continuación de la relación con la OACI para la reevaluación de los parámetros mencionados con el paso del tiempo, con la posibilidad de acortar lo más posible las fechas o la necesidad de fabricar más cantidad de halón ya que, según OACI, puede que no haya suficiente halón para la industria de aviación civil con los que realizar el mantenimiento de las aeronaves que se fabrican actualmente. Se hace hincapié en que, antes de esto, es necesario mejorar la recuperación de halones ya existentes.

En la Decisión XXIX/9, se observa que el Comité de opciones técnicas sobre halones considera la posibilidad de que se sigan necesitando agentes inertes entre 2020 y 2030 para aeronaves de rescate y extinción de incendios.

2.3 Regulación Europea

La Unión Europea ha publicado su propia regulación teniendo en cuenta las restricciones al uso de halón impuestas por el Protocolo de Montreal.

La “Ozone Regulation” (Regulation (EC) No 1005/2009) [15] se caracteriza por asegurar que la Unión Europea cumple con las cuestiones relativas a la capa de ozono establecidas internacionalmente y por tener una gran ambición por proteger la capa de ozono y luchar contra el cambio climático.

En esta Regulación, el halón 1211, halón 1301 y halón 2402 están listados como sustancias controladas que dañan la capa de ozono. Como requiere el Protocolo de

Montreal, la producción de estas sustancias ha sido prohibida desde 1994, pero se permite su utilización en algunos “usos críticos” en los que se incluyen las aeronaves. Por lo tanto, para la sustitución de halones por otras sustancias alternativas en aeronaves se han establecido las llamadas “cut-off dates” (fecha a partir de la cual no se pueden utilizar halones en extintores o sistemas de protección contra incendios para nuevos equipos y nuevas instalaciones) y “end dates” (a partir de la cual no se pueden utilizar halones en ningún caso, y los equipos que los contengan deben ser dados de baja) (se puede encontrar su definición detallada en el Anexo VI de la Ozone Regulation). A partir de estas fechas, el uso de halón ya no es considerado crítico y, por tanto, deja de estar permitido.

A raíz de la normativa europea, la European Aviation Safety Agency (EASA) ha publicado la *EASA halon guide* [16], que es una guía para aclarar como la Ozone Regulation afecta a los productos aeronáuticos. Además, ofrece un resumen de las reglas aplicables al uso de halón en la industria de la aviación. Esta guía va a ser analizada en los subcapítulos 2.3.1 y 2.3.2.

La Ozone Regulation pone límites a la producción, importación, exportación, lugar en el mercado, uso, recuperación, reciclaje, reclamación y destrucción de las sustancias dañinas para la capa de ozono.

Se debe tener en cuenta que la definición de productos nuevos depende de la fecha de presentación de la solicitud del certificado de tipo a la autoridad, como se explica en el Reglamento (UE) 2017/605 de la Comisión [17].

La siguiente tabla procede del Anexo VI de la Ozone Regulation. En ella se muestra el uso actual de halones en las aeronaves, así como las fechas en las que entra en vigor la regulación contra estas sustancias.

Purpose	Type of extinguisher	Type of halon	Cut-off date (31 December)	End date (31 December)
Protection of normally unoccupied cargo compartments	Fixed system	1301 1211 2402	2018	2040
Protection of cabins and crew compartments	Portable extinguisher	1211 2402	2014	2025
Protection of engine nacelles and auxiliary power units	Fixed system	1301 1211 2402	2014	2040
Inerting of fuel tanks	Fixed system	1301 2402	2011	2040
Protection of lavatory waste receptacles	Fixed system	1301 1211 2402	2011	2020
Protection of dry bays	Fixed system	1301 1211 2402	2011	2040

Tabla 1: Usos de halones en aeronaves con “cut-off date” y “end date” [16]

Se observa que en zonas a las que no se puede acceder físicamente durante el vuelo, como la bodega de carga, los tanques de combustible o los motores, el uso se considera “crítico durante más tiempo (hasta 2040). Esto es porque hay que cumplir con una regulación más estricta ya que hay que garantizar que el incendio se sofoca sin poder comprobarlo visualmente.

Las fechas propuestas en la tabla anterior pueden ser derogadas únicamente por la Comisión Europea y solo en el caso en el que se demuestre que no hay una alternativa posible, tanto por motivos técnicos como económicos.

2.3.1 Normas de la Unión Europea en el contexto de la aviación

En el Reglamento (UE) N.º 748/2012 de la Comisión [18] se establecen las disposiciones de aplicación sobre la certificación de aeronavegabilidad y medioambiental de aeronaves y productos aeronáuticos, así como la certificación de las organizaciones de diseño y producción.

En la Ozone Regulation, las aeronaves se consideran equipos y se establece que “equipos nuevos” son aquellos en los que, hasta la “cut-off date”, no ha ocurrido ninguna de las siguientes situaciones:

- Firma del contrato de adquisición o desarrollo correspondiente.
- Presentación de una solicitud a la autoridad correspondiente para la aprobación o certificación de tipo. Para las aeronaves, “presentación de una solicitud de certificación de tipo” significa la presentación de una solicitud de una nueva certificación de tipo de aeronave.

Para la industria de la aviación, “equipo nuevo” es un producto nuevo (diseño de tipo de aeronave) y la “cut-off date” debe compararse con la fecha de presentación de la solicitud del nuevo certificado de tipo [18]. Esto no se aplica a un producto modificado, para el cual se realiza una solicitud para cambiar un certificado de tipo existente o para un certificado de tipo suplementario (ver ejemplo 1 más abajo).

En la definición de “equipo nuevo” aplicable a la industria de la aviación, la “fecha de presentación de una solicitud de aprobación de tipo o certificación de tipo” es la fecha de la solicitud original y no la fecha de cualquier solicitud de extensión (ver ejemplos 2, 3 y 4 más abajo).

Las disposiciones de la Ozone Regulation sobre halones se aplican a los productos aeronáuticos de la UE, pero también a los productos aeronáuticos extranjeros, comercializados en la UE. Antes de introducir los productos en el mercado de la UE, debe asegurarse de que cumplen los requisitos de la UE en lo que respecta, entre otras cosas, a la protección del medio ambiente. Hay que tener en cuenta que la “autoridad reguladora apropiada” es la autoridad certificadora, pero no la autoridad validadora, es decir, una aeronave diseñada por una organización bajo la jurisdicción de un país miembro de EASA, la autoridad es EASA. Si estuviera bajo la jurisdicción de Estados Unidos, esta sería FAA (ver ejemplos 5, 6 y 7 más abajo).

2.3.2 Ejemplos: Posibles situaciones

A continuación, se van a mostrar algunos ejemplos para identificar posibles situaciones y aclarar si el uso de halón está permitido o no según la Ozone Regulation.

Ejemplo 1

EASA recibe una solicitud para el cambio en el certificado de tipo de una aeronave, donde se desea reemplazar el sistema de extinción de incendios de CO₂ por un nuevo sistema usando halón 1301.

Al no tratarse de un “equipamiento nuevo” como se define en la Ozone Regulation, el uso de halón está aceptado incluso si la fecha de la solicitud es posterior a la “cut-off date”.

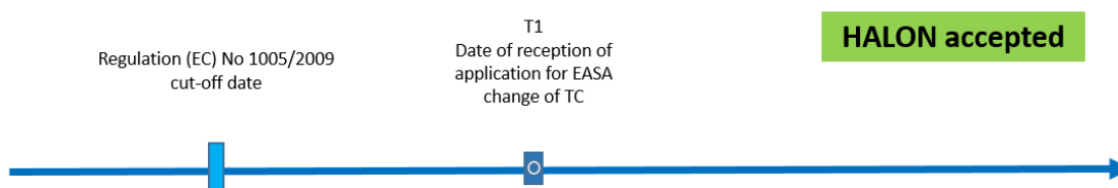


Figura 9: Solicitud de cambio del certificado de tipo después de la “cut-off date” [16].

Ejemplo 2

EASA recibe una solicitud para un nuevo certificado de tipo en una fecha anterior a la “cut-off date”. El uso de halón esta aceptado.



Figura 10: Solicitud de un nuevo certificado de tipo antes de la “cut-off date” [16].

Ejemplo 3

EASA recibe una solicitud para un nuevo certificado de tipo después de la “cut-off date”. El uso de halones no está aceptado.



Figura 11: Solicitud de un nuevo certificado de tipo después de la “cut-off date” [16].

Ejemplo 4

EASA recibe una solicitud original para un nuevo certificado de tipo antes de la “cut-off date” pero se solicita una extensión de la solicitud después de la “cut-off date”. El uso de halones está aceptado.

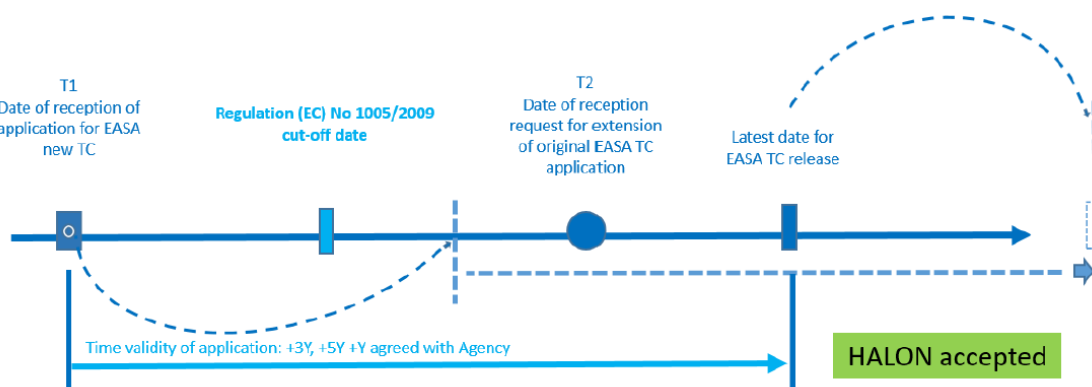


Figura 12: Extensión de la solicitud de certificado de tipo después de la “cut-off date” [16].

Ejemplo 5

La aplicación para la certificación de un nuevo tipo de aeronave se solicita antes de la “cut-off date” a una agencia reguladora extranjera (autoridad certificadora) y a EASA (autoridad validadora). El uso de halones está aceptado.

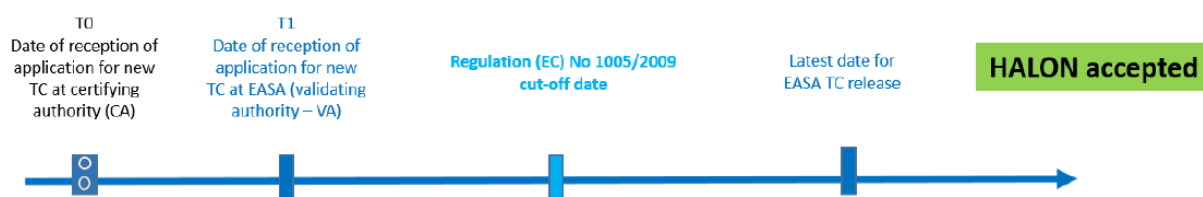


Figura 13: Producto extranjero, aplicación a la autoridad certificadora y autoridad validadora antes de la “cut-off date” [16].

Ejemplo 6

La solicitud de certificación de un nuevo tipo de aeronave a una autoridad reguladora extranjera (autoridad certificadora) se presenta antes de la “cut-off date”, y la solicitud similar se presenta a EASA (autoridad validadora) después de la “cut-off date”. Se acepta el uso de halones, ya que la autoridad reguladora correspondiente es la autoridad certificadora.

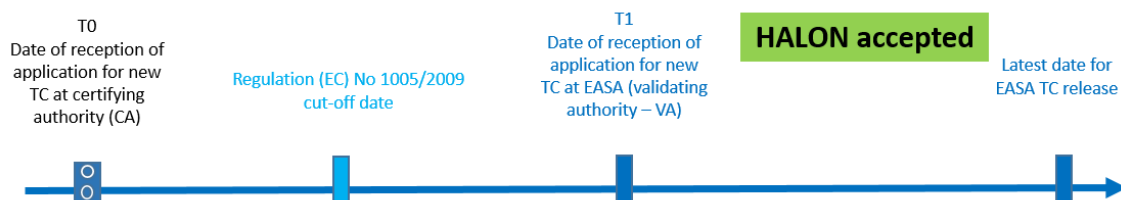


Figura 14: Producto extranjero, aplicación a la autoridad certificadora antes de la “cut-off date” y a la autoridad validadora después de la “cut-off date” [16].

Ejemplo 7

Las solicitudes de un nuevo certificado de tipo a una autoridad reguladora extranjera (autoridad certificadora) y a EASA (autoridad validadora) son posteriores a la “cut-off date”. El uso de halones no está permitido.

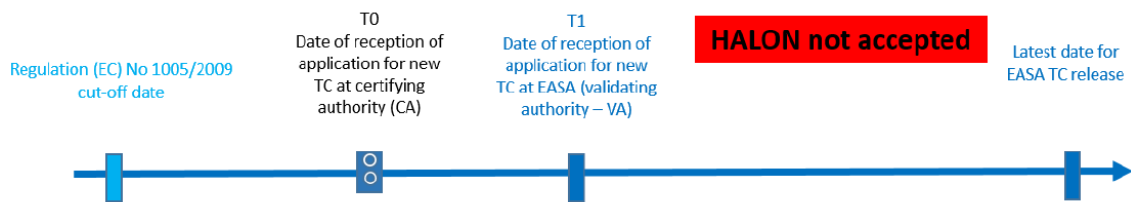


Figura 15: Producto extranjero, aplicación a la autoridad certificadora y autoridad validadora después de la “cut-off date” [16].

Como conclusión, en la siguiente tabla se puede observar, de forma resumida, la comparativa entre el estándar OACI y el de la Unión Europea.

Dates for halons replacement				
Purpose	Fire Extinguisher location	Ozone Regulation Regulation (EC) No 1005/2009 as amended by (EU) 744/2010	Aviation standards	
			ICAO Convention on International Civil Aviation	Regulation (EU) 2015/640 (Part-26) as amended by (EU) 2019/133
Retrofit (end date)	Unoccupied cargo compartments	2040	Not specified	Not specified
	Hand-held in cabin & crew compartments	2025		
	Lavatory waste receptacles	2020		
	Engine nacelle & Auxiliary Power Units	2040		
Forward fit (new CofA)	Unoccupied cargo compartments	Not specified	Not specified	Not specified
	Hand-held in cabin & crew compartments		2016 (Annex 6) 39th Assembly: shift to 2018	May 18, 2019
	Lavatory waste receptacles		2011	February 18, 2020
	Engine nacelle & Auxiliary Power Units		Not specified	Not specified
Cut-off (new application for type certificate)	Unoccupied cargo compartments	2018	2024 (Annex 8) 39th Assembly: will be adapted within 2 years.	Not specified
	Hand-held in cabin & crew compartments	2014	Not mentioned	
	Lavatory waste receptacles	2011	2014	
	Engine nacelle & Auxiliary Power Units	2014	2014	

Figura 16: Comparativa entre el estándar OACI y el de la UE [16].

2.4 FAA

Teniendo en cuenta las decisiones tomadas por la FAA, expuestas en el documento *FAA Halon ARC Final Report [19]*, los requerimientos para la sustitución del halón en la industria de la aviación son muy similares a los indicados por EASA, no existiendo ninguna diferencia en lo más relevante, que son los plazos.

Las fechas límite para la sustitución de estas sustancias establecidas por la regulación estadounidense son exactamente las mismas que las de la Tabla 1.

Además, se establece que, en el momento que sea técnica y económicamente viable, se sustituirá el halón por otra sustancia menos contaminante para la extinción de incendios a bordo.

Chapter 3. ESTUDIO Y ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Como se ha visto en el capítulo de regulación, dadas las fechas límite, se observa que la bodega de carga es uno de los lugares de la aeronave donde se presenta una mayor dificultad de extinción de incendios a la hora de que se genere un fuego. Por lo tanto, en este apartado se va a hacer hincapié en métodos, estrategias y posibles sustancias alternativas al halón en este habitáculo.

Durante las últimas cuatro décadas, las bodegas de carga de los aviones han sido protegidas con sistemas de extinción de incendios que utilizan halón 1301. Es un agente eficaz y no supone ningún riesgo para los pasajeros. Sin embargo, hay dos amenazas a la vista que deben ser abordados con urgencia. Clean Aviation, el estudio europeo de innovación aeronáutica dentro del programa marco de I+D, lanzó el proyecto EFFICIENT (Environmentally Friendly Fire suppression for Cargo using Innovative greEN Technology) [20] con el objetivo de convertir estas amenazas en una oportunidad única para la aviación europea. A continuación, se desarrollan los principales aspectos de este proyecto.

El halón 1301 es un agente extintor muy efectivo ya que no se necesita gran cantidad de agente para lograr sus objetivos de protección contra incendios, por lo tanto, no agrega mucho peso a la aeronave. Además, cuando se usa hay que utilizar una concentración que hace que sea seguro para las personas. Por lo tanto, desde el punto de vista del consumo de combustible, la seguridad y la economía, el halón es idóneo. Por este motivo se ha utilizado durante las últimas décadas para proteger de incendios la bodega de carga de las aeronaves.

Pero, a pesar de la idoneidad del halón 1301 para la lucha contra incendios en la aviación, como se ha visto en los capítulos anteriores, el halón agota la capa de

ozono, por lo que es necesario presentar en el futuro un nuevo programa de aviones equipados con un sistema libre de halones.

En aeronáutica, los esfuerzos para proteger la capa de ozono se adoptaron en 2008 en el marco del Protocolo de Montreal y, a su vez, la Comisión Europea lanzó el Reglamento (CE) n.º 1005/2009 (Ozone Regulation). Es un problema grave que afecta al transporte aéreo europeo, aunque la regulación solo se aplica a los nuevos certificados de tipo, no a los aviones de producción actual o derivados.

Otro tiempo a al que hay que hacer frente es el riesgo de obsolescencia. Se ha hecho un estudio de la disponibilidad de halones a nivel mundial llevado a cabo por un grupo dentro del programa ambiental de la ONU y ha determinado que las existencias mundiales de halones están disminuyendo y podrían agotarse antes de las fechas de corte establecidas por la regulación. Por lo tanto, además del medio ambiente, existe un riesgo comercial para las operaciones en la industria de la aviación.

El proyecto EFFICIENT de Clean Sky, promovido por Airbus, tiene como objetivo diseñar, desarrollar, fabricar y probar un sistema de extinción de incendios en la bodega de carga libre de halones, respetuoso con el medio ambiente y económicamente viable, reduciendo el impacto ambiental al reducir el peso y la contaminación producida por las aeronaves. Este proyecto se presenta como una colaboración entre la Universidad de Cranfield, el SP Technical Research Institute of Sweden y la London South Bank University. Todos ellos se esfuerzan por llegar a una solución completamente nueva libre de halones que proporcione al menos un nivel de seguridad equivalente en comparación con el halón 1301.



Figura 17: Fuselaje de aeronave para pruebas de extinción de incendios [20].

La oportunidad comercial que ofrece Clean Aviation con el proyecto EFFICIENT es muy buena, ya que, si desarrolla un reemplazo para los halones, además de los beneficios ambientales, va a permitir vender estas nuevas metodologías y los resultados del estudio a las empresas aeronáuticas de todo el mundo ya que, por regulación, necesitarán una alternativa al halón en el futuro.

El tiempo que es que una sustancia sustituta creada artificialmente con características químicas similares al halón 1301 tardaría más de 10 años en desarrollarse, tendría un precio excesivamente alto y sería demasiado arriesgado de desarrollar a nivel comercial. Existen alternativas al halón 1301 que son adecuadas para aplicaciones terrestres, pero no cumplen con los estrictos requisitos de supresión de incendios en la aviación. El equipo de EFFICIENT ha examinado las posibilidades desde una variedad de ángulos.

Se realizó una investigación de mercado con respecto a los agentes alternativos y los desarrollos en el mercado, analizando lo que está disponible y lo que podría estar disponible en el futuro. Se seleccionaron los agentes potenciales y se propusieron recomendaciones, teniendo en cuenta los estrictos requisitos de seguridad y rendimiento que debe cumplir el agente. El trabajo actual se centra en el uso de gases inertes como agentes para reemplazar al halón.

La empresa Zodiac Aerotechnics ha estado trabajando en un sistema de generación de gas inerte a bordo (On-Board Inert Gas Generating System) que proporciona nitrógeno en tal cantidad y calidad que permite la supresión segura de un incendio en la bodega de carga en todas las condiciones operativas. La complicación de este sistema es que la sustitución del halón por un gas inerte no permite el diseño de soluciones simples de reemplazo directo. Es necesario considerar nuevas filosofías de sistemas y arquitecturas de sistemas multifuncionales en próximos estudios de sustitución de halones como sistemas de extinción de incendios en bodegas de carga.

Uno de los colaboradores de EFFICIENT, la London South Bank University, ha realizado algunas pruebas de eliminación de incendios a gran escala. La primera consideración que impulsará el diseño de la arquitectura del sistema es la cantidad de agente que se necesita para lograr la extinción de incendios y qué concentración se requiere. La Universidad también realizó algunas pruebas de extinción de incendios a escala de laboratorio para especificar la concentración requerida, así como algunas pruebas de explosión a escala de laboratorio para determinar cuánta concentración se necesita para contener una atmósfera enriquecida con propano.

Conocida la concentración requerida, es posible usar este dato preliminar para diseñar la arquitectura, que es la columna vertebral del sistema, y es posible explorar qué opciones técnicas existen tanto para generar el agente a bordo como almacenarlo en cilindros de alta presión.

Para garantizar la extinción de un incendio son necesarias dos fases, el apagado y asegurar que no se reactive. Para ello, hay que aplicar una primera descarga para apagarlo e inundar toda la bodega de carga con la concentración requerida. Después, hay que soltar una segunda descarga de manera progresiva para mantener la concentración de agente extintor en el ambiente. Se debe tener en cuenta que la bodega de carga no es 100% hermética y hay fugas al exterior. Por tanto, esta segunda descarga sirve para compensar las pérdidas que se puedan tener y es fundamental para que no se vuelva a reactivar el fuego.

La presión dentro de la bodega de carga se ve significativamente afectada por los cambios en la densidad del ambiente cuando la aeronave cambia de altitud, lo que a su vez cambia el patrón de distribución del agente. Un aspecto importante del proyecto EFFICIENT ha sido cómo simular condiciones de vuelo realistas cambiando la temperatura y la presión, sin el gasto de usar un avión real en vuelo, lo que hace que los costes de las pruebas sean menores. Los demostradores representativos son

esenciales para alcanzar el objetivo del proyecto alcanzando Technology Readiness Level (TRL) 6.

Una buena herramienta de análisis, antes de realizar estos ensayos, es la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés), que sirve para predecir la distribución del agente dentro de la bodega de carga. Sus resultados son de muy alta calidad, pero lleva mucho tiempo obtener esos resultados. Paralelamente al proyecto EFFICIENT se desarrolló una nueva herramienta de simulación que permite una evaluación más rápida con respecto a la arquitectura de extinción de incendios. Se basa en los resultados obtenidos del proyecto Clean Sky. Esto podría ser de ayuda en el desarrollo de nuevos sistemas libres de halones.

Para trasladar la teoría estudiada al proyecto EFFICIENT, se realizaron ensayos CFD y se complementaron con pruebas en tierra, que incluyeron una campaña de test de extinción de incendios a gran escala. Las pruebas de descarga y distribución de agentes en condiciones de vuelo representativas se realizaron en las instalaciones de pruebas de vuelo de Fraunhofer en Holzkirchen, Alemania.

Las instalaciones de Fraunhofer consisten en un gran recipiente tubular a presión que contiene parte del fuselaje delantero de un Airbus A310 completo con bodega de carga, donde es posible enfriar toda la instalación y cambiar la presión para crear condiciones de vuelo realistas. La instalación puede incluso simular perfiles de descenso para representar cambios bruscos en la altitud para determinar cómo se comporta el agente a lo largo del tiempo. Dado que es una prueba bastante realista, los resultados y la información obtenida son fundamentales para evaluar si se han cumplido o no los objetivos de protección contra incendios.



Figura 18: Fuselaje delantero de Airbus A310 para pruebas de presión [20].

3.1 Metodología de estudio

La metodología de estudio se va a fundamentar en trabajos anteriores que constituyen la referencia de este trabajo. Comenzando con el proyecto Clean Sky 2, uno de sus objetivos es desarrollar un sistema de protección contra incendios respetuoso con el medio ambiente para sustituir el halón en la bodega de carga de la aeronave, como se ha visto en la introducción de este capítulo. Para ello, se equipó una aeronave de demostración, incluida la bodega de carga, con un sistema de extinción de incendios basado en el nitrógeno. Como herramienta de diseño, se ha desarrollado un modelo de simulación refinado zonalmente para predecir la distribución local de concentración de oxígeno y nitrógeno en la bodega de carga utilizando el sistema "Indoor Environment Simulation Suite" (IESS) [21]. El modelo permite simulaciones transitorias rápidas de la operación del sistema de extinción.

La distribución homogénea y eficiente del agente de extinción de incendios dentro de la bodega de carga de una aeronave es fundamental para proteger la aeronave de un incendio en la bodega de carga y para lograr los objetivos de protección contra incendios. Los sistemas de extinción de incendios en aeronaves deben proporcionar protección durante varias horas. Por lo tanto, el sistema debe ser adecuado para

mantener una atmósfera de extinción de incendios segura dentro de la bodega de carga durante el tiempo especificado.

El sistema de eliminación de fuego de la bodega de carga tiene dos fases principales, una fase de derribo que disminuye el fuego, ya sea enfriándolo o reduciendo la concentración de oxígeno, como se describe en la Minimum Performance Standard (MPS) [22], seguida de la fase de mantenimiento para conservar el ambiente extintor dentro de la bodega de carga durante la fase de vuelo y aterrizaje. Los principales parámetros de diseño para el dimensionamiento del sistema son el volumen de la bodega de carga, la concentración objetivo del agente y la estanqueidad. Por ejemplo, el sello de la puerta de carga está sujeto al gradiente entre el fuselaje presurizado y las condiciones ambientales en crucero y, por lo tanto, tiene fugas de aire. Este aire se reemplaza con aire fresco aspirado a través del Sistema de Gestión de Presión (PMS, por sus siglas en inglés) para garantizar el equilibrio de los flujos de aire. Por tanto, es necesario un suministro controlado de agente adicional para compensar la entrada de aire durante la fase de mantenimiento. Además, el PMS evita los picos de presión durante la inyección del agente que provocarían la apertura de los paneles de descompresión rápida al permitir que el aire salga de la bodega de carga.

Hoy en día, se libera una gran cantidad de halones de las botellas para llevar a cabo la primera fase en dos minutos, y luego se mantiene el entorno de supresión de incendios dentro de la bodega de carga mediante la medición constante de halones. Sin embargo, debido al alto potencial de agotamiento del ozono de los halones, la industria aeroespacial está buscando sistemas alternativos. El uso de nitrógeno como agente de supresión, que diluye la concentración de oxígeno en la bodega de carga por debajo del punto de inflamabilidad, es una de esas alternativas que se está investigando dentro del proyecto EFFICIENT de Clean Sky 2. Dentro del proyecto, se desarrolla una cadena de herramientas de simulación que predice la distribución de la concentración del agente dentro de la bodega de carga, y se implementa una demostración física a gran escala en la instalación de prueba de vuelo, una cámara de baja presión que alberga la sección frontal de un A310, incluida la zona de bodega de carga delantera.

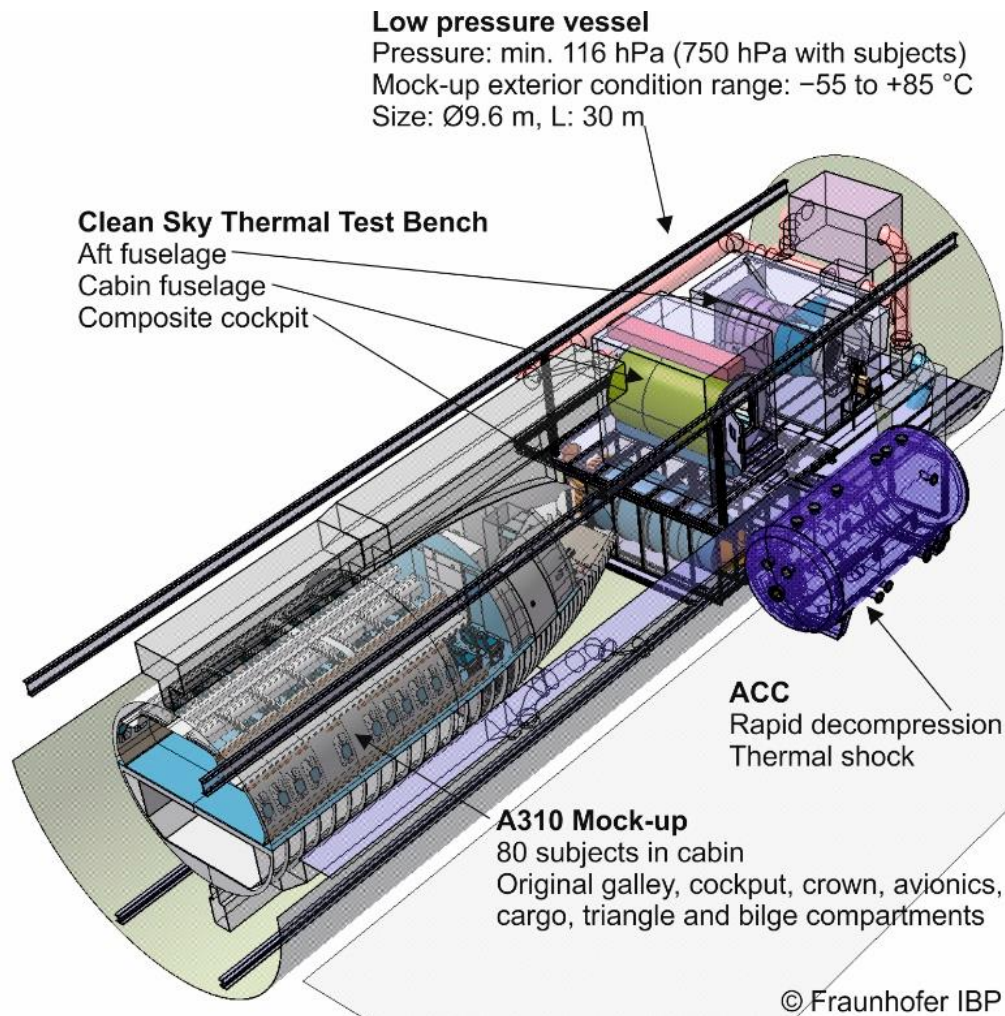


Figura 19: Laboratorio para pruebas de presión con cabina de A310 [21].

En el documento [21] se presentan los resultados de la validación transitoria de una caída de nitrógeno seguida de una fase de mantenimiento y descenso.

Se han realizado varias actividades de modelado para la tecnología de reemplazo de halones con sistemas de extinción de incendios utilizando generadores de gas de propulsor sólido, gases inertes y agua nebulizada, incluyendo simulaciones CFD. Sin embargo, estos modelos simulan la distribución del agente a presión constante y puntos de operación únicos que no están refinados localmente. En los sistemas de eliminación de incendios de la bodega, las fases transitorias de apagado, retención y descenso tienen un impacto significativo en la distribución del agente dentro de la bodega de carga. La ubicación de los puntos de entrada de aire, como el sistema PMS o las fugas, influyen aún más en el gradiente de distribución del agente local en la bodega de carga.

Los modelos CFD diseñados son rápidos de ejecutar, sin embargo, estos modelos no proporcionan una distribución de agente local dentro de la bodega de carga. Proporcionan los detalles de la distribución del agente, pero requiere una gran cantidad de recursos para la simulación, especialmente cuando se consideran las fases transitorias. El IESS utiliza un enfoque de simulación híbrido, donde el régimen de flujo de alto impulso cerca de la boquilla de descarga ha sido simulado previamente por CFD, y los resultados de este dominio de campo cercano se han integrado en un modelo zonal de la bodega de carga.

En la referencia [21], se muestra un resultado de validación para tal simulación transitoria. Para ello, se ha integrado un sistema de apagado y retención basado en nitrógeno en la maqueta de la aeronave de A310. La bodega de carga ha sido equipada con sensores para medir la concentración local de oxígeno. Se implementa un perfil de presión de cabina realista de despegue, crucero y descenso utilizando un recipiente de baja presión, que puede generar una presión ambiental similar a las condiciones de crucero (750 hPa, correspondiente a una altura equivalente de 8.000 pies).

Como conclusión, el modelo IESS:

- Es una herramienta de diseño de la misión de extinción de incendios en la bodega de carga de aeronaves.
- Sirve para predecir casos de carga críticos para la bodega de carga.
- Sirve para predecir el efecto del cambio de geometría cuando se considera un tamaño de aeronave diferente.
- Es extensible para otros tipos de agentes extintores.

De la validación del modelo se deduce que el IESS es capaz de predecir la concentración de oxígeno en la bodega de carga para un perfil de misión transitoria con una precisión del 1%. Para el diseño de un sistema de extinción de incendios basado en nitrógeno, esta desviación máxima detectada sugiere apuntar a un punto de ajuste de diseño de una concentración de oxígeno del 12 % para cumplir de forma fiable con el requisito de una concentración residual de oxígeno del 13 %.

Para los ensayos considera una bodega de carga vacía. En investigaciones futuras se puede considerar el efecto de los contenedores colocados en la bodega de carga, que obstruyen las vías del flujo de aire, para hacer un modelo más completo y fiable.

En la referencia [22] se incluyen las características que tiene que cumplir una sustancia para que pueda ser utilizada como agente extintor en la bodega de carga de una aeronave, incluyendo las pruebas a realizar y las situaciones de fuego que tiene que ser capaz de controlar.

La extinción completa de un incendio por inundación implica la descarga de un agente extintor limpio que normalmente se requiere para brindar protección dentro de la envolvente de diseño durante un período mínimo de diez minutos. El tiempo de retención se define como el período de tiempo requerido para que una concentración definida de agente se libere en un umbral específico (generalmente, el 80% de la concentración de descarga inicial) a una altura específica en el área (a menudo elegido como el punto de combustibles más altos o en 75% de la altura máxima de la zona). La referencia [23] contiene un estudio en el que se han realizado treinta y cuatro experimentos para validar los modelos de predicción de tiempo de retención estándar aplicados a una variedad de agentes extintores limpios. Para ello, se ha utilizado un recinto experimental de 103 metros cúbicos para observar los flujos de fuga a través de los límites del cubículo. Las áreas de fuga superior e inferior varían para determinar el efecto sobre los tiempos de retención de siete agentes extintores gaseosos disponibles comercialmente: FK-5-1-12, HFC-125, HFC-227ea, HFC-23, IG-100, IG-541 e IG-55. En estudios previos, que evaluaron las tasas de fuga de agentes, se muestra que las predicciones del modelo a menudo son inexactas, dando como resultado aproximaciones de tiempo de retención demasiado conservadoras y optimistas.

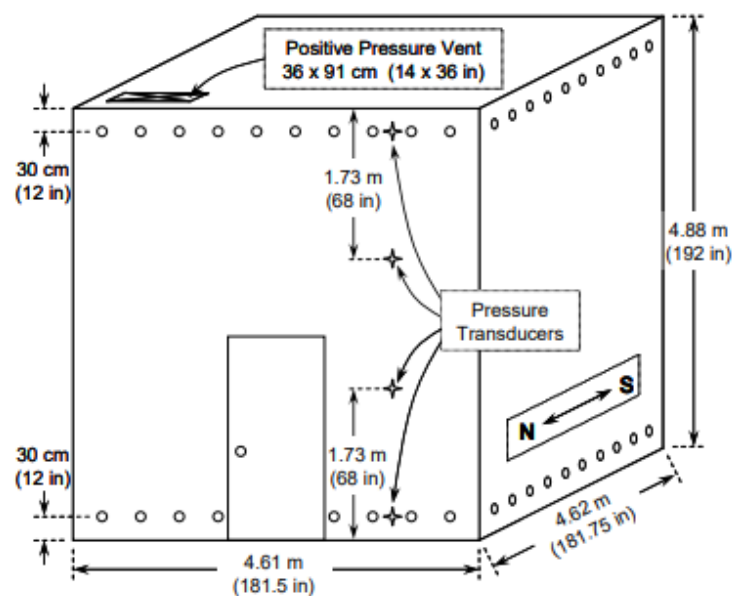


Figura 20: Esquema de cámara de pruebas de fuga de ambiente extintor utilizando IG-541 [23].

La “fan integrity test” abarca el método de prueba y el modelado de fugas utilizado para evaluar el diseño del sistema de inundación total con respecto al requisito de tiempo de retención. Las normas NFPA 2001, Anexo C e ISO 14520-1, Anexo E contienen estándares de diseño de integridad, que se eligieron para el análisis comparativo debido a la adopción y uso predominantes en todo el mundo. Los resultados experimentales se validan frente a las predicciones de tiempo de espera de estos estándares.

Los resultados indican que el tiempo de retención real es más extenso que la predicción del tiempo teórico cuando se evalúa como el tiempo requerido para que la concentración del agente sea el 50 % de la concentración de descarga inicial. En esta condición, los tiempos de retención experimentales suelen ser hasta un 50 % más largos que en la predicción teórica. Es decir, la predicción teórica es poco conservativa, ya que cuanto mayor sea el tiempo de retención, más se tarda en liberar la cantidad de agente extintor necesario para apagar el incendio.

La precisión de las predicciones del tiempo de retención teórico disminuye considerablemente cuando este se evalúa como una reducción del 15 % en la concentración del agente. Las predicciones teóricas de acuerdo con las teorías de interfaz descendente suelen ser demasiado optimistas, lo que da como resultado tiempos de espera experimentales hasta un 50 % más cortos que el valor predicho. La teoría de la interfaz descendente generalmente da como resultado estimaciones de tiempo de espera demasiado conservadoras, produciendo valores experimentales típicamente por debajo del 100% pero, también, hasta un 150% más largos que el valor teórico.

La edición de 2008 de NFPA 2001 exige que el agente extintor tarde en liberarse el tiempo de retención especificado a no menos del 15 % por debajo de la concentración de descarga inicial. Este estudio indica que la aplicación de la teoría de las normas de diseño NFPA 2001 o ISO 14520-1 mostrará resultados inexactos para predicciones de tiempo de espera para una reducción del 15 % en la concentración del agente. Dependiendo del estándar de diseño elegido, el usuario puede esperar que el tiempo de retención real se desvíe de la predicción teórica en cualquier lugar, desde un 50 % negativo hasta un 150 % positivo.

En la referencia [24], se propone un modelo de zonas para estudiar la extinción de incendios obstruida por un sistema de agua nebulizada de inundación total en una

cámara con diferentes condiciones de ventilación. Este es un modelo térmico de una única zona que se puede utilizar, principalmente, para simular escenarios donde el agua es el principal mecanismo de extinción de incendios. Se han utilizado los parámetros de caudal de agua y diámetro medio volumétrico de una gota para caracterizar el sistema de agua nebulizada. El fuego se toma como fuente de calor y su tasa de liberación de calor está relacionada con el consumo de oxígeno. Se han resuelto las ecuaciones de conservación de masa y energía para compuestos gaseosos bajo situación de fuego. La extinción de incendios se predice investigando el límite de concentración de oxígeno. Los resultados numéricos se verifican mediante dos conjuntos de experimentos sobre el sistema de extinción de incendios con agua nebulizada. Los resultados predichos a nivel teórico coincidieron cualitativamente con los experimentos realizados. Además, los resultados previstos por este modelo también se comparan con otros modelos existentes. Finalmente, se analizan los factores que afectan el mecanismo de extinción de incendios y se discuten las limitaciones del modelo.

A medida que los sistemas de extinción de incendios con agua nebulizada se vuelven cada vez más comunes, existe la necesidad de transformar la experiencia práctica acumulada en modelos cuantitativos. Como contribución a este proceso, el artículo [25] propone un modelo informático transitorio de una zona para la supresión total de incendios mediante neblina de agua de inundación en recintos ventilados. El enfoque de una zona se basa en la capacidad observada experimentalmente de los rociadores de agua para mezclar el volumen de gas del espacio protegido. A partir de esta suposición, el modelo resuelve la evolución temporal de la temperatura, la densidad y composición del gas y la concentración de agua nebulizada dentro del espacio protegido. El modelo incorpora una descripción detallada de la fase líquida (gotas de niebla) y el proceso de evaporación. La extinción de una llama de hidrocarburo se predice teniendo como base el concepto de temperatura de llama adiabática. Las posibilidades y limitaciones del modelo se demuestran mediante la validación con datos experimentales de pruebas de extinción de incendios en espacios a gran escala.

Una nueva tecnología para la distribución de supresores de incendios en aplicaciones de inundación total es la tecnología del generador de gas propulsor sólido (SPGG). El artículo [26] presenta estudios experimentales y de modelado de uno de estos sistemas prototipo para comprender mejor las observaciones en las pruebas de este sistema. Este sistema SPGG en particular genera partículas finas que actúan para extinguir cualquier incendio en conjunto con los gases inertes que también se generan

en el sistema SPGG. Las condiciones iniciales para las simulaciones se obtienen a partir de las medidas disponibles del sistema prototipo. El modelado proporciona información clave relacionada con la distribución de las partículas y su eficacia potencial como extintor de incendios. La variable principal en el diseño de SPGG fue el tamaño de partícula, con tamaños de partícula típicos medidos en 2 y 15 μm . El resultado clave del modelo es que existe un compromiso entre la distribución más uniforme de partículas y la relación superficie-volumen disponible para la supresión química. También se proporciona información sobre la disipación térmica del sistema SPGG [26].

El artículo [27] presenta la herramienta de generación de modelos térmicos de Modelica. El objetivo de esta herramienta es permitir al usuario configurar un modelo térmico geoméricamente correcto para geometrías complejas que permita predecir el impacto de los dispositivos de calefacción y su ubicación tanto en términos de patrón de flujo de aire como de distribución de radiación. Usando un archivo de geometría exportado desde un software CAD, la herramienta distribuye elementos de pared, nodos de aire y calcula la matriz de factor de vista radiante de onda larga para superficies obstruidas y no obstruidas. Esta información se exporta como código Modelica. El modelo zonal VEPZO se utiliza para modelar el flujo de aire dentro de un dominio (espacio cerrado). Este modelo permite predecir el flujo de aire y la distribución de la temperatura del aire en el espacio en una malla gruesa y, por lo tanto, calcula más rápido que los CFD clásicos. Las paredes se subdividen en la misma cuadrícula en la que se establece el modelo zonal. Para cada elemento pared, la herramienta de generación de modelos térmicos de Modelica calcula los factores de vista para los otros elementos del dominio. En el artículo [27] se presenta la comparación de resultados simulados con datos de prueba y la aplicación de la herramienta de generación de modelos térmicos de Modelica para una habitación con calefacción radiante y para la refrigeración de la cabina de un avión.

Por otro lado, el artículo [28] presenta el modelo VEPZO (Velocity Propagating Zonal model), el primer modelo tridimensional de flujo de aire para espacios interiores que se ha implementado en Modelica. El modelo predice el flujo de aire y la distribución de la temperatura en una habitación. La principal característica del modelo VEPZO es que cada zona tiene una velocidad característica en función de los flujos de aire que entran y salen. Esta velocidad característica se propaga en el espacio asegurando la propagación de los flujos de aire impulsores. El modelo VEPZO se puede interconectar con otros modelos de la biblioteca *Modelica.Standard*. En un ejemplo de aplicación, se

investiga una ventilación por desplazamiento en la cabina de un avión de dos pasillos. La temperatura en las zonas ocupadas se pronostica entre 20,6 y 23,0 °C.

El artículo [29] presenta un modelo para estimar la radiación solar en condiciones de cielo despejado sobre objetos estacionarios, en movimiento y voladores. Para este último, es importante predecir la irradiación solar máxima en condiciones de cielo despejado para calcular la carga térmica solar máxima posible. En el artículo [29] se presentan los resultados de la irradiación sobre la superficie en tierra y sobre las ventanas y parabrisas de aeronaves a altitud de crucero. Otro modelo implementado, calcula el factor de vista entre dos o más superficies. Hay varias soluciones analíticas disponibles para calcular los factores de vista para configuraciones simples y conocidas. Muchos programas de simulación de edificios estiman los factores de vista de forma simplificada, especialmente cuando se trata de geometrías complejas. El enfoque simplificado puede dar lugar a grandes errores en las temperaturas de la superficie, lo que puede provocar aún más errores en el resultado de balance de energía y la estimación del nivel de confort. El propósito de crear este modelo es calcular los factores de vista entre geometrías complejas. En el artículo [29] se presentan las matrices de factor de vista de un espacio cerrado y de una geometría con aberturas en sus superficies. También se presenta un análisis de sensibilidad de una matriz de factores de visualización.

La extinción de incendios es un requisito de certificación de seguridad importante para las aeronaves, como lo es para todos los sistemas críticos de seguridad. Se requieren análisis de riesgos en las etapas de diseño y certificación para determinar las probabilidades y los medios para mitigar tales riesgos. La referencia [30] muestra un enfoque para naves espaciales, [31] para barcos de pasajeros y [32] para reactores. Una herramienta de análisis importante para las aeronaves es el proceso de análisis zonal [33]. Dichos análisis incluyen la investigación de los medios de extinción de incendios para los cuales el uso del halón 1301 fue una opción popular. La producción de Halón y varios halocarbonos fueron prohibidas bajo el Protocolo de Montreal en 1994, lo que requiere una investigación para el uso de agentes que no dañen el medio ambiente para esta aplicación. El objetivo principal del documento [34] es determinar la “concentración de diseño” de nitrógeno requerida para la extinción de incendios. En el documento se describe la dinámica de fluidos computacional (CFD), en combinación con la verificación experimental. El índice de flujo de aire en el modelo de quemador se varió entre 10 l/min y 40 l/min para un modelo numérico de baja velocidad y se validó con la prueba de quemador BS ISO 14520 (BS ISO 14520

Anexo, 2006) para determinar la concentración de extinción de nitrógeno. Como conclusión, el estudio reveló que la concentración de diseño de nitrógeno era del 34% (concentración de oxígeno del 14%). Investigaciones posteriores sugirieron que, a caudales de aire bajos (caso de 10 l/min y 20 l/min), las distorsiones producidas en el flujo conducían a mediciones erróneas de la concentración de oxígeno en los experimentos. El modelo de extinción de incendios se amplió a un incendio de charco de n-heptano en un recinto de gran volumen. La concentración de diseño registrada fue de aproximadamente un 39 % de nitrógeno adicional correspondiente a una concentración de oxígeno del 13 % por volumen. Se observó que el peso de nitrógeno requerido aumentó 7,5 veces en comparación con el uso de Halón 1301 para este modelo. En trabajos futuros se pueden explorar los sistemas de seguridad contra incendios de la bahía del motor y la carga de los aviones a través de las pruebas y simulaciones del Estándar de rendimiento mínimo (MPS), usando nitrógeno como agente.

Desde que el Protocolo de Montreal dijo que el halón es muy contaminante y es necesario su reemplazo por otros agentes, se han desarrollado gran cantidad de estudios para evaluar sustitutos a este compuesto, teniendo en cuenta su poder de extinción y su efecto sobre las personas, las cosas y el medio ambiente.

La agencia de estado americana para la protección ambiental (EPA) desarrolló un programa para estudiar las posibles alternativas al halón, llamado programa SNAP (Significant New Alternatives Policy). En él se evaluaban distintos agentes extintores teniendo en cuenta parámetros como la toxicidad, las propiedades fisicoquímicas, la eficacia contra incendios, el tiempo de vida en la atmosfera y el potencial de agotamiento del ozono [35].

Teniendo en cuenta estas características, y añadiendo el peso y capacidad para almacenar en espacios reducidos como puntos fundamentales en aeronáutica, los parámetros a tener en cuenta en este proyecto para evaluar posibles alternativas al halón serían:

- Seguridad para las personas: para la extinción de incendios en zonas ocupadas, la concentración de diseño tiene que estar por debajo de estos dos parámetros:
 - o NOAEL “No Observed Adverse Effect Level”. Se refiere a la dosis más alta de una sustancia en un estudio de toxicidad que no causa efectos

nocivos perceptibles o medibles en los sujetos de prueba. En otras palabras, el NOAEL es la dosis máxima que se puede consumir o aplicar sin producir efectos adversos. El concepto de NOAEL se usa comúnmente en toxicología y evaluación de riesgos para determinar los niveles de exposición seguros para los seres humanos y el medio ambiente.

- LOAEL significa “Lowest Observed Adverse Effect Level”. Se refiere a la dosis más baja de una sustancia en un estudio de toxicidad que causa efectos nocivos o adversos en los sujetos de prueba. En otras palabras, el LOAEL es la dosis mínima que se sabe que causa efectos adversos. El LOAEL se utiliza junto con el NOAEL para ayudar a determinar los niveles de exposición seguros para los seres humanos y el medio ambiente. La diferencia entre LOAEL y NOAEL se utiliza para calcular una ingesta diaria admisible (IDA) o una dosis de referencia (RfD), que son medidas de la cantidad de una sustancia que se puede consumir o aplicar diariamente durante toda la vida sin causar daño. En agentes inertes, otro factor limitante es que la concentración de oxígeno en el aire sea suficiente para poder respirar.
- Propiedades de extinción: concentraciones de extinción del agente, tiempo de descarga.
- Limpieza de equipos: el agente extintor debe no dejar residuos y no debe ser conductor para el caso de equipos eléctricos.
- Impacto ambiental: se considera el potencial de agotamiento de ozono u Ozone Depleting Potential (ODP), el potencial de calentamiento global (o efecto invernadero) o Global Warming Potential (GWP) y el tiempo de vida en la atmósfera o Atmosphere Life Time (ALT). Parámetros que deban ser lo más bajos posible.
- Peso: aunque no afecta a la seguridad, una reducción de peso es clave para la reducción del consumo de combustible de aeronaves.
- Volumen de almacenamiento: en aeronáutica, el espacio que ocupa es fundamental. Debe poder almacenarse la cantidad necesaria en un espacio reducido.

En resumen, la metodología de estudio que se ha empleado en este trabajo se basa en las referencias mencionadas en este capítulo y que consiste en comparar métricas de los nuevos agentes de extinción de incendios con el halón en los siguientes parámetros clave:

- Características físico- químicas y anti incendios
- Tiempo de descarga
- Peso
- Volumen
- Otras propiedades relevantes para comparar resultados

3.2 Resultados y análisis

No es simple el evaluar cuantitativamente las sustancias alternativas al halón como agentes contra incendios en aeronaves. Para ello, se han definido, en el capítulo anterior, una serie de características en función de las cuales unos elementos pueden destacar por encima de otros.

En este trabajo, el estudio se va a centrar en 15 compuestos, incluido el halón 1301 para poder comparar las propiedades de las nuevas alternativas frente a las características de extinción que existen actualmente. Estos compuestos son: Halon-1301, IG-01, IG-55, IG-100, IG 541, FC-3-1-10, HCFC mezcla A, HCFC mezcla B, HCFC 124, HFC 125, HFC 227ea, HFC 23, HFC 236fa, FIC-13I1 y FK-5-1-12.

Se van a presentar estos compuestos organizados en tablas con sus propiedades más relevantes, para poder compararlos entre sí. A continuación, se muestran los agentes extintores elegidos con la fórmula química del compuesto y su nombre comercial, utilizado en la industria.

Agente extintor	Fórmula	Nombre comercial
Halon-1301	CF ₃ Br (Trifluorobromometano)	-
IG-01	Ar	Argotec, Argonfire
IG-55	50% N ₂ , 50% Ar	Argonite
IG-100	N ₂	NN100
IG 541	52% N ₂ , 40% Ar, 8% CO ₂	Inergen
FC-3-1-10	C ₄ F ₁₀ (Perfluorobutano)	CEA-410

HCFC mezcla A	4,75% HCFC-123 82% HCFC-22 9,5% HCFC-124 3,75% Isopropenyl-1-metilci-clohexano	NAF S-III
HCFC mezcla B	HCFC-123, 95 mol% min, Argon, 0.2 mol% min, CF4, 0.4 mol% min	Halotron I
HCFC 124	CHClFCF3 (Clorotetrafluoroetano)	FE-241
HFC 125	CHF2CF3 (Pentafluoroetano)	FE-25
HFC 227EA	CF3CHFCF3 (Heptafluoropropano)	FM-200, FE-227
HFC 23	CHF3 (Trifluorometano)	FE-13
HFC 236FA	CF3CH2CF3 (Hexafluoropropano)	FE-36
FIC-13I1	CF3I (Trifluoroyodometano)	Triodide
FK-5-1-12	CF3CF2C(O)CF(CF3)2 (Dodecafluoro-2-metilpentan-3-ona)	NOVEC

Tabla 2: Fórmula y nombre comercial de los agentes extintores.

En la siguiente tabla se presentan las características de los compuestos como agentes extintores, como la clase de fuegos que tienen capacidad de apagar, el método de extinción y el tiempo de descarga típico que necesitan los extintores actuales, cargados con estos compuestos.

Agente extintor	Clase de fuegos	Método de extinción	Tiempo de descarga
Halon-1301	A, B y C	Inhibición	1 – 2 segundos
IG-01	A, B y C	Sofocación	45 segundos
IG-55	A, B y C	Sofocación	60 – 120 segundos
IG-100	A, B y C	Sofocación	<60 segundos
IG 541	A, B y C	Sofocación	60 – 90 segundos
FC-3-1-10	A, B y C	Inhibición	<10 segundos
HCFC mezcla A	A, B y C	Absorción de calor También por inhibición	<10 segundos

HCFC mezcla B	A, B y C	Absorción de calor También por inhibición	12 segundos
HCFC 124	A, B y C	Absorción de calor También por inhibición	<10 segundos
HFC 125	A, B y C	Absorción de calor También por inhibición	<10 segundos
HFC 227EA	A, B y C	Absorción de calor También por inhibición	<10 segundos
HFC 23	A, B y C	Absorción de calor También por inhibición	<10 segundos
HFC 236FA	A, B y C	Absorción de calor También por inhibición	<10 segundos
FIC-13I1	A, B y C	Absorción de calor También por inhibición	<10 segundos
FK-5-1-12	A, B y C	Absorción de calor También por inhibición	<10 segundos

Tabla 3: Capacidad de extinción de incendios de los agentes extintores.

En la Tabla 3 se observa que todos los compuestos analizados son válidos para fuegos de clases A, B y C. En cambio, el método de extinción es diferente en alguno

de ellos. El halón apaga el fuego rompiendo la reacción en cadena necesaria para que la reacción de combustión continúe. Dentro de los agentes estudiados, este método lo comparte con el FC-3-1-10. Por otro lado, los gases inertes, apagan el fuego sofocándolo, esto es, desplazando el oxígeno y haciendo que no pueda tener lugar la reacción de combustión. Finalmente, la mayoría de los agentes presentan el método de absorción de calor o enfriamiento, aunque, en parte, también extinguen el fuego por inhibición de la reacción en cadena. De entrada, no se considera un método mejor que otro ya que todos ellos cumplen su función.

El tiempo de descarga es un parámetro crítico, ya que el fuego hay que apagarlo lo más rápido posible. Cuanto antes se libere el agente, antes comienza a apagar el fuego. Según los resultados de la Tabla 3, se pueden hacer tres grupos para este parámetro. El primer grupo estaría formado únicamente por el halón, que presenta el tiempo más rápido de todos los agentes analizados, de 1-2 segundos. El segundo grupo es el de todos los gases halogenados, con un tiempo de descarga inferior a 10 segundos. Por último, y con tiempos superiores a los 45 segundos, están los gases inertes.

Se sabe que el halón es el mejor extintor, pero los gases halogenados no tienen un tiempo de descarga muy elevado ya que ninguno supera los 10 segundos, excepto el HCFC mezcla B que se demora 12 segundos. En cambio, los gases nobles se demoran demasiado para ser utilizados en un avión en vuelo. A bordo de una aeronave no se puede permitir que la liberación de la totalidad del agente extintor tarde mucho más de 10 segundos. Por lo tanto, los gases nobles no son válidos para sustituir al halón.

Un factor clave a la hora de elegir un agente extintor alternativo al halón es la toxicidad. Un agente que sea tóxico no se puede utilizar en zonas ocupadas, independientemente de las propiedades que tenga frente a la extinción de incendios. Para ver si se pueden utilizar en zonas ocupadas, se compara el NOAEL frente a la concentración de extinción necesaria. Si la concentración de extinción es superior al NOAEL, no se puede garantizar la seguridad de las personas y, por tanto, estos agentes solo se pueden utilizar en zonas no ocupadas.

Además de estas características, en la siguiente tabla se muestra el LOAEL y la concentración de oxígeno en aire que permanece después de haber aplicado el agente. Los gases inertes son los únicos que desplazan el oxígeno al aplicarse, ya que

apagan el fuego por sofocación. El resto de compuestos no hacen variar la concentración de oxígeno.

Agente extintor	NOAEL	LOAEL	Concentración de extinción	Concentración de oxígeno en aire durante la extinción	¿Se puede utilizar en zonas ocupadas?
Halon-1301	5%	7.5%	5%	No desplaza el oxígeno	Sí
IG-01	43%	52%	40%	12.2%	Sí
IG-55	43%	52%	36%	12.5%	Sí
IG-100	43%	52%	36%	12.5%	Sí
IG 541	43%	52%	40%	12.6%	Sí
FC-3-1-10	40%	>40%	7.1%	No desplaza el oxígeno	Sí
HCFC mezcla A	12%	14%	12%	No desplaza el oxígeno	Sí
HCFC mezcla B	5%	7.5%	12%	No desplaza el oxígeno	No
HCFC 124	1%	3%	8.5%	No desplaza el oxígeno	No
HFC 125	7.5%	10%	10%	No desplaza el oxígeno	No
HFC 227EA	9%	11%	5% - 7.1%	No desplaza el oxígeno	Sí
HFC 23	30%	>30%	12% - 16%	No desplaza el oxígeno	Sí
HFC 236FA	10%	15%	5.9%	No desplaza el oxígeno	Sí
FIC-131I	0.2%	0.4%	3.6%	No desplaza el oxígeno	No
FK-5-1-12	10%	>10%	4.60%	No desplaza el oxígeno	Sí

Tabla 4: Toxicidad de los agentes extintores.

En la Tabla 4 se destacan los principales parámetros a tener en cuenta sobre la toxicidad de los agentes, lo que permite saber si se pueden utilizar en zonas ocupadas por personas o no. No tiene sentido comparar estos parámetros entre unos agentes y otros ya que, lo relevante es la diferencia que presenta cada agente entre NOAEL y LOAEL frente a la concentración de extinción. Cuanto mayor sea esta diferencia, mayor es la seguridad. Entre NOAEL y LOAEL, para hacer la comparativa, se usa el NOAEL ya que es más restrictivo.

En el caso del halón, tiene un NOAEL de un 5%, que coincide con su concentración de extinción. No hay margen de error, pero se podría utilizar en zonas ocupadas. Hay otros compuestos con un mejor comportamiento en este caso. Los gases nobles presentan el valor de NOAEL más alto de todos los agentes analizados, con un 43%. Su concentración de extinción es de 36-40%, por lo que se podrían usar sin problema.

Entramos a analizar los gases halogenados, en los que cada uno tiene unas propiedades de toxicidad muy diferentes entre ellos. Hay algunos que presentan un margen significativo de seguridad entre NOAEL y concentración de extinción, siendo buenos candidatos para proteger contra incendios las zonas más sensibles. Por ejemplo, el FC-3-1-10 presenta un NOAEL un 32.9% superior a la concentración de extinción, convirtiéndose en un buen sustituto, o el HFC 23 con un margen de 14-18%.

Por otro lado, hay cuatro agentes dentro de los casos estudiados que presentan una concentración de extinción superior al NOAEL, estos son el HCFC mezcla B, HCFC 124, HFC 125 y FIC-1311. Por lo tanto, no pueden ser utilizados en zonas habitadas y se van a descartar como posible sustituto del halón en este estudio.

Otras propiedades a tener en cuenta en la toma de decisión de qué agente utilizar en zonas críticas es la cantidad de residuos que deja cuando el fuego se apaga, la visibilidad durante la extinción o si es o no conductor de la electricidad. En la siguiente tabla se muestran estos parámetros:

Agente extintor	Residuos	Visibilidad	¿Conductor de la electricidad?
Halon-1301	No	Buena	No
IG-01	No	Buena	No
IG-55	No	Buena	No
IG-100	No	Buena	No
IG 541	No	Buena	No
FC-3-1-10	No	Buena	No
HCFC mezcla A	No	Buena	No
HCFC mezcla B	No	Buena	No
HCFC 124	No	Buena	No
HFC 125	No	Buena	No
HFC 227EA	No	Buena	No
HFC 23	No	Buena	No
HFC 236FA	No	Buena	No
FIC-1311	No	Buena	No
FK-5-1-12	No	Buena	No

Tabla 5: Residuos, visibilidad y conducción eléctrica de los agentes extintores.

En la Tabla 5, se ve que ninguno de los agentes analizados deja residuos tras su uso, todos presentan buenas propiedades de visibilidad mientras se están utilizando y ninguno de ellos es conductor de la electricidad. Al tener las mismas propiedades, en este caso, no permite la comparativa ni el descarte.

El principal motivo por el que se necesita sustituir al halón por otros compuestos es el factor contaminante. Para ver la contaminación que provocan los distintos agentes, se analizan tres parámetros: el ODP (Ozone Depleting Potential), GWP (Global Warming Potential) y ALT (Atmosphere Life Time). Se destacan en rojo los resultados más perjudiciales para el medio ambiente.

Agente extintor	ODP	GWP	ALT
Halon-1301	10	6290	65 años
IG-01	0	0	0 (Derivado de la atmósfera)
IG-55	0	0	0 (Derivado de la atmósfera)
IG-100	0	0	0 (Derivado de la atmósfera)
IG 541	0	0	0 (Derivado de la atmósfera)
FC-3-1-10	0	5500	2600 años
HCFC mezcla A	0.022	619	5.9 años
HCFC mezcla B	0	3.42	28.2 años
HCFC 124	0.022	619	5.9 años
HFC 125	0	3.5	29 años
HFC 227EA	0	3.22	31 años
HFC 23	0	14.8	222 años
HFC 236FA	0	9.81	242 años
FIC-1311	0.0001	1	0.005 años
FK-5-1-12	0	1	0.019 años

Tabla 6: Parámetros de contaminación atmosférica de los agentes extintores.

En la Tabla 6 se comparan los parámetros de contaminación atmosférica. La alta contaminación producida por el halón es lo que ha obligado a buscar un sustituto, por tanto, es necesario que el compuesto elegido como alternativa no sea contaminante o presente un efecto mínimo para la atmósfera.

Los gases nobles son los que mejor comportamiento tienen ya que están formados por gases que están presentes en la atmósfera.

En el caso de los gases halogenados, se presentan parámetros de contaminación muy diferentes entre ellos. El ODP del halón es de 10, siendo 455 veces superior al 0.022 del HCFC mezcla A y del HCFC 124, o 100000 veces superior respecto del 0.0001 del FIC-13I1. Aun así, el resto de estos compuestos presentan un ODP de 0, lo que hace que sean muy atractivos teniendo en cuenta la capa de ozono.

Si se analiza el efecto de calentamiento global (GWP) se distinguen cuatro órdenes de magnitud a grandes rasgos. El halón y el FC-3-1-10 presentan los valores más elevados, del orden de varios miles, los compuestos HCFC mezcla A y HCFC 124 presentan un valor de GWP de 619, el compuesto HFC23 presenta un valor cercano a 15 y, por último, el resto de los compuestos presentan valores inferiores a 10, destacando el FIC-13I1 y el FK-5-1-12 con un GWP de 1.

Para terminar con los parámetros que afectan al medio ambiente, conviene comparar el tiempo de vida en la atmósfera de estos gases. El halón presenta un ALT de 65 años, lo cual no es un tiempo muy elevado. Un compuesto que se descarta debido, entre otras cosas, a su tiempo de permanencia en la atmósfera es el FC-3-1-10 con un tiempo de 2600 años. El HFC 23 y HFC 236FA presentan valores superiores a los 200 años, por lo que podría ser un parámetro a tener en cuenta para su descarte. En cambio, el resto de los compuestos presentan tiempos bajos, incluso inferiores al halón, destacando el FIC-13I1 con un ALT de 0.005 o el FK-5-1-12 con un valor de 0.019.

A continuación, se muestran algunas de las propiedades químicas más representativas de estos agentes, a tener en cuenta para el estudio. Se destaca el punto de ebullición a 1013 bar, la presión de vapor a 20°C, la masa molecular en g/mol y la densidad en kg/m³ a 20°C. Los dos primeros permiten saber si, una vez llenado el depósito de agente extintor a presión, este va a encontrarse en estado líquido o gaseoso. Lógicamente, esto influye en la densidad y en la capacidad de almacenamiento.

Los parámetros de masa molecular y densidad son muy relevantes ya que permiten, posteriormente, llegar a conclusiones sobre el volumen de agente que se necesita para proteger un volumen determinado, y el peso añadido que va a suponer.

En el momento de comparar es bueno tener en cuenta que la masa molecular del aire es de 29 g/mol y su densidad es de 1.21 kg/m³ a 20°C.

Agente extintor	Punto de ebullición a 1013 bar (°C)	Presión de vapor (a 20°)	Masa molecular (g/mol)	Densidad (kg/m ³) (a 20°C)
Halon-1301	-57.8	16 bar	148.9	1540 (líquido)
IG-01	-185.9	-	39.95	1.66 (gas)
IG-55	-196	-	33.98	1.41 (gas)
IG-100	-195.8	-	28	1.16 (gas)
IG 541	-196	152.2 bar	34	1.41 (gas)
FC-3-1-10	-1.7	2.9 bar	238.03	1594 (líquido)
HCFC mezcla A	-38.3	8.25 bar	92.9	1200 (líquido)
HCFC mezcla B	27	12.57 bar	150.7	1190 (líquido)
HCFC 124	-12	3.3 bar	136.48	1373 (líquido)
HFC 125	-48	12.05 bar	120	1148 (líquido)
HFC 227EA	-16.4	3.91 bar	170	1407 (líquido)
HFC 23	-82.1	41.8 bar	70.01	807 (líquido)
HFC 236FA	-1.4	2.3 bar	152.04	1377 (líquido)
FIC-13I1	-22.5	4.65 bar	195.9	2096 (líquido)
FK-5-1-12	49	0.3 bar	316.04	1616 (líquido)

Tabla 7: Propiedades químicas de los agentes extintores.

En la Tabla 7 se comparan las propiedades químicas de los distintos agentes extintores, tales como el punto de ebullición, presión de vapor, masa molecular y densidad. Estas propiedades no son relevantes en sí mismas, sino que permiten hacer los cálculos y el análisis de pesos y volúmenes que se muestran, a continuación, en la

Notas:

- (1) Masa del agente por m³ de espacio protegido (kg/m³).
- (2) Porcentaje de volumen de agente líquido por m³ de espacio protegido (L/m³).
- (3) Densidad máxima de llenado de un cilindro (kg/m³).
- (4) Cociente entre el volumen de agente en el cilindro por m³ de espacio protegido, adimensional.

Tabla 8. Si un compuesto tiene una masa molecular inferior a otro, pero su capacidad de extinción es grande, aunque pese más, quizá sea mejor alternativa teniendo en cuenta el factor peso, ya que hará falta menos cantidad del agente para proteger la misma zona.

Analizando brevemente, los compuestos con mayor masa molecular son el FK-5-1-12 con 316 g/mol y el FC-3-1-10 con 238 g/mol. Por otro lado, los compuestos más ligeros son los gases nobles y, dentro de los gases halogenados, destacan el HFC 23 con una masa molecular de 70 g/mol y el HCFC mezcla A con 93 g/mol.

Respecto a la densidad, todos los compuestos se presentan en estado líquido a 20°C cuando se cargan a presión en una botella de extinción de incendios, excepto los gases nobles, debido a su bajo punto de ebullición. Dentro de los gases halogenados, la densidad más baja la presenta el HFC 23, siendo un 52% de la que presenta el halón 1301. Por otro lado, la más elevada la tiene el FIC-13I1, con un 136% la del halón. En ese rango se encuentran las densidades de todos los compuestos.

Una vez establecidas las propiedades básicas de los compuestos, se puede profundizar en su estudio como agentes extintores. En la siguiente tabla se muestran los siguientes resultados:

- Masa del agente por m³ de espacio protegido: Cuanto menor sea este valor para un compuesto, menor será la masa necesaria para proteger una zona determinada.
- Volumen de agente líquido por m³ de espacio protegido: Al igual que el parámetro anterior, cuanto menor sea este valor, menor será el volumen de almacenamiento necesario para proteger una zona.
- Densidad máxima de llenado de un cilindro: Partiendo de las propiedades químicas de estos compuestos, existe una densidad máxima de llenado de los tanques de almacenamiento. Al necesitar el mínimo peso con el mínimo volumen posible se necesitaría una densidad máxima de llenado alta.
- Volumen de agente en el cilindro por m³ de espacio protegido: Este parámetro adimensional se calcula como: (masa de agente por m³ de espacio protegido [kg/m³]) / (densidad máxima de llenado de un cilindro [kg/m³]) = (Volumen de cilindro / m³ de espacio protegido). Este es el resultado más importante a efectos de volumen ya que define las dimensiones del cilindro necesario para proteger una determinada zona.

Agente extintor	Masa por volumen (1)	Porcentaje de volumen de agente líquido (2)	Densidad (3)	Ratio de volúmenes (4)
------------------------	-----------------------------	--	---------------------	-------------------------------

Halon-1301	0.331	21.0	1121	0.00030
IG-01	0.662	N/A	172	0.00384
IG-55	0.662	N/A	216	0.00307
IG-100	0.662	N/A	160	0.00413
IG 541	0.662	N/A	193	0.00343
FC-3-1-10	0.761	46.2	1281	0.00056
HCFC mezcla A	0.577	48.1	900	0.00064
HCFC mezcla B	0.733	61.6	929	0.00079
HCFC 124	0.549	40.0	1185	0.00046
HFC 125	0.64	52.5	929	0.00069
HFC 227EA	0.625	44.4	1150	0.00054
HFC 23	0.571	70.8	860	0.00066
HFC 236FA	0.631	45.9	1200	0.00053
FIC-13I1	0.389	18.6	1680	0.00023
FK-5-1-12	0.778	48.2	1480	0.00053

Notas:

- (1) Masa del agente por m³ de espacio protegido (kg/m³).
- (2) Porcentaje de volumen de agente líquido por m³ de espacio protegido (L/m³).
- (3) Densidad máxima de llenado de un cilindro (kg/m³).
- (4) Cociente entre el volumen de agente en el cilindro por m³ de espacio protegido, adimensional.

Tabla 8: Resultados de masa y volumen de los agentes extintores, necesarios para apagar un incendio.

Para los gases inertes, el volumen de agente líquido por m³ de espacio protegido no aplica ya que, a temperatura ambiente y comprimidos para ser almacenados en el cilindro, permanecen en estado gaseoso.

Por último, se ha realizado la comparativa de los compuestos frente al halón 1301 en los parámetros de masa y de volumen de agente por m³ de espacio protegido, quedando como se muestra en la siguiente tabla:

Agente extintor	Masa relativa al Halón 1301	Volumen de agente por m³ de espacio
------------------------	------------------------------------	---

		protegido relativo al Halón 1301
Halon-1301	1	1
IG-01	2	13
IG-55	2	10.4
IG-100	2	14
IG 541	2	11.6
FC-3-1-10	2.3	1.9
HCFC mezcla A	1.74	2.17
HCFC mezcla B	2.22	2.67
HCFC 124	1.66	1.57
HFC 125	1.93	2.33
HFC 227EA	1.89	1.84
HFC 23	1.73	2.25
HFC 236FA	1.91	1.78
FIC-13I1	1.18	0.79
FK-5-1-12	2.35	1.78

Tabla 9: Masa y volumen de los agentes extintores relativos al Halón 1301.

En la

Notas:

- (1) Masa del agente por m³ de espacio protegido (kg/m³).
- (2) Porcentaje de volumen de agente líquido por m³ de espacio protegido (L/m³).
- (3) Densidad máxima de llenado de un cilindro (kg/m³).
- (4) Cociente entre el volumen de agente en el cilindro por m³ de espacio protegido, adimensional.

Tabla 8 y en la Tabla 9 se tratan los parámetros de peso y volumen de agente necesarios para proteger una zona concreta. Estos resultados son críticos en aeronáutica ya que, se necesita, que el agente extintor necesario, ocupe el menor espacio posible para poder ser instalado entre el resto de los sistemas a bordo, y que pese lo mínimo posible, para no afectar a las actuaciones de la aeronave.

Los gases nobles tienen el doble de masa que el halón, pero el volumen de agente necesario para proteger una zona dada es entre 10 y 14 veces el que necesita el compuesto a sustituir. Con este parámetro se confirma el descarte de los gases nobles como alternativa al halón en aeronaves.

Todos los gases halogenados analizados pesan más que el halón y necesitan un volumen superior, excepto el FIC-1311, que si bien pesa 1.18 veces el halón, presenta un volumen necesario de 0.79 veces, por lo que presentaría una mejora frente a la utilización actual. Además de este compuesto, solo hay dos agentes más que no llegan a duplicar alguno de los valores frente al halón. Estos son, el HCFC 124, con una masa de 1.66 veces la del halón y un volumen de 1.57 veces, el HFC227EA, con una masa de 1.89 veces y un volumen de 1.84 veces, y el HFC 236FA, con una masa de 1.91 veces y un volumen de 1.78 veces el del halón.



Figura 21: Comparativa de cilindros y espacio [36].

Resumiendo lo comentado en este capítulo, en la siguiente tabla se agrupan los distintos agentes en función de la posibilidad que tienen de ser el potencial sustituto al halón. Algunos de ellos han sido descartados por diferentes motivos.

Agente extintor	¿Descartado?	Motivo del descarte
Halon-1301	Sí	Alta contaminación (ODP y GWP)
IG-01	Sí	-Tiempo de descarga muy elevado

		-Se necesita un gran volumen de agente para proteger una zona
IG-55	Sí	-Tiempo de descarga muy elevado -Se necesita un gran volumen de agente para proteger una zona
IG-100	Sí	-Tiempo de descarga muy elevado -Se necesita un gran volumen de agente para proteger una zona
IG 541	Sí	-Tiempo de descarga muy elevado -Se necesita un gran volumen de agente para proteger una zona
FC-3-1-10	Sí	Alta contaminación (GWP y ALT)
HCFC mezcla A	Sí	Alta contaminación (ODP y GWP) (no tan alta como el halón, pero se busca un agente no contaminante)
HCFC mezcla B	Sí	-No se pueden utilizar en zonas ocupadas -Tiempo de descarga ligeramente superior al resto de gases halogenados

HCFC 124	Sí	-No se pueden utilizar en zonas ocupadas -Alta contaminación (ODP y GWP) (no tan alta como el halón, pero se busca un agente no contaminante)
HFC 125	Sí	No se pueden utilizar en zonas ocupadas
HFC 227EA	No	-
HFC 23	No	-
HFC 236FA	No	-
FIC-1311	Sí	No se pueden utilizar en zonas ocupadas, sería una buena opción para extintor de motores
FK-5-1-12	No	-

Tabla 10: Agentes descartados como sustitutos al halón.

Se observa que los agentes que continúan en el estudio como posibles candidatos son el HFC 227EA, HFC 23, HFC 236FA y FK-5-1-12. En la siguiente tabla se muestran todos los datos de estos agentes frente al halón para poder compararlos fácilmente.

Agente extintor	Halon-1301	HFC 227EA	HFC 23	HFC 236FA	FK-5-1-12
Fórmula	CF ₃ Br (Trifluorbromo metano)	CF ₃ CHF ₂ CF ₃ (Heptafluoropropano)	CHF ₃ (Trifluorometano)	CF ₃ CH ₂ CF ₃ (Hexafluoropropano)	CF ₃ CF ₂ C(O)C F(CF ₃) ₂ (Dodecafluoro-2-metilpentan-3-ona)
Nombre comercial	-	FM-200, FE-227	FE-13	FE-36	NOVEC
Clase de fuegos	A, B y C	A, B y C	A, B y C	A, B y C	A, B y C

Método de extinción	Inhibición	Absorción de calor También por inhibición	Absorción de calor También por inhibición	Absorción de calor También por inhibición	Absorción de calor También por inhibición
Tiempo de descarga	1 - 2 segundos	<10 segundos	<10 segundos	<10 segundos	<10 segundos
NOAEL	5%	9%	30%	10%	10%
LOAEL	7.5%	11%	>30%	15%	>10%
Concentración de extinción	5%	5% - 7.1%	12% - 16%	5.9%	4.60%
Concentración de oxígeno en aire durante la extinción	No desplaza el oxígeno	No desplaza el oxígeno	No desplaza el oxígeno	No desplaza el oxígeno	No desplaza el oxígeno
¿Se puede utilizar en zonas ocupadas?	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Residuos	No	No	No	No	No
Visibilidad	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena
¿Conductor de la electricidad?	No	No	No	No	No
ODP	10	0	0	0	0
GWP	6290	3.22	14.8	9.81	1
ALT	65 años	31 años	222 años	242 años	0.019 años
Punto de ebullición a 1013 bar (°C)	-57.8	-16.4	-82.1	-1.4	49
Presión de vapor (a 20°)	16 bar	3.91 bar	41.8 bar	2.3 bar	0.3 bar
Masa molecular (g/mol)	148.9	170	70.01	152.04	316.04
Densidad (kg/m³) (a 20°C)	1540 (líquido)	1407 (líquido)	807 (líquido)	1377 (líquido)	1616 (líquido)

Masa del agente por m3 de espacio protegido (kg/m3)	0.331	0.625	0.571	0.631	0.778
Masa relativa al Halón 1301	1	1.89	1.73	1.91	2.35
Volumen de agente líquido por m3 de espacio protegido (L/m3)	0.21	0.444	0.708	0.459	0.482
Densidad máxima de llenado de un cilindro (kg/m3)	1121	1150	860	1200	1480
Volumen de agente en el cilindro por m3 de espacio protegido (m3/m3)	0.0002953	0.0005435	0.0006640	0.0005258	0.0005257
Volumen de agente por m3 de espacio protegido relativo al Halon 1301	1	1.84	2.25	1.78	1.78

Tabla 11: Comparativa final de agentes extintores potenciales.

De la comparativa entre HFC 227EA y HFC 23 se puede observar como el valor de Global Warming Potential es un 80% inferior para el primero y el ALT casi un 90%

inferior, sin embargo, la masa de agente por m³ de espacio protegido es un 10% superior. Aunque el volumen por m³ de espacio protegido es un 20% inferior en el caso del HFC 227EA. Esto se puede traducir en que para la utilización en aeronáutica donde tanto peso como volumen son críticos, en mejor utilizar el HFC 227EA.

Si se compara el HFC 227EA frente al HFC 236FA, al igual que la comparativa anterior, también se da un valor inferior de GWP y ALT por parte del primero, en este caso de un 70% y 90% inferior, respectivamente. Además, la masa de HFC 227EA necesaria para cubrir una zona es un 1% inferior frente al HFC 236FA. Por otro lado, el volumen necesario para el primer agente es un 3% superior. En este caso, en la diferencia de porcentajes masa-volumen gana el HFC 236FA, pero en los parámetros de contaminación, el HFC 227EA es muy superior. En función de los porcentajes se elige el HFC 227EA, aunque en futuros estudios se podrían comparar estos compuestos en mayor detalle.

Finalmente, se compara el HFC 227EA con el FK-5-1-12. En este caso, los parámetros de contaminación GWP y ALT son un 70% y 99% más bajos en el segundo compuesto. Además, el volumen necesario de agente es también inferior para el FK-5-1-12, concretamente un 3%. En cambio, la masa necesaria de HFC 227EA es un 20% inferior. En este caso, la diferencia en los parámetros de contaminación es muy elevada a favor del FK-5-1-12, pero es necesario destacar que los valores del HFC 227EA no son muy elevados. Por tanto, debido a la diferencia de porcentajes entre masa y volumen, se elige el HFC 227EA. En estudios futuros se puede analizar con más detalle el efecto contra el medio ambiente y si merece la pena sacrificar propiedades técnicas por esta reducción de GWP y ALT.

Como conclusión de todo lo anterior, se elige el HFC 227EA como sustituto al halón. Este compuesto es mejor que el halón en todos los parámetros que afectan a la contaminación atmosférica y peor en todos los parámetros técnicos necesarios para extinguir un incendio, siendo los más importantes el tiempo de descarga, la masa y el volumen de agente por m³ de espacio protegido.

Para refrendar los resultados y conclusiones de los resultados y análisis anteriores, Boeing publicó en el año 2011 el documento Fleet Team Digest 737NG-FTD-26-11001 [37]. En él, se menciona el P/N 10-61909-8 como sustituto para extintor de incendios del baño para el modelo de aeronave B737-NG. Este P/N se refiere a una botella para extinción de incendios cargada con el compuesto HFC-227EA.

Además, según la EASA NOTICE OF PROPOSED AMENDMENT (NPA) NO 2011-14 [38], actualmente los compuestos HFC-227EA y HFC-236FA se están utilizando en gran cantidad de casos en aviones grandes y, normalmente, están considerados como aceptables por EASA.



Figura 22: Extintor del baño del Boeing B737-NG [39].

Chapter 4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Como se ha visto en el desarrollo del estudio, no es tarea fácil encontrar el sustituto perfecto para el halón ya que, algunos agentes, ofrecen algunas propiedades muy buenas, incluso tan buenas como el halón, pero siempre penalizando otras. Hay que llegar a una solución de compromiso para que el compuesto sea adecuado, como se ha descrito en el capítulo 3. Los mejores candidatos son HFC 227EA, HFC 23, HFC 236FA y FK-5-1-12 según se concluye en este estudio.

La mayoría de los agentes analizados no pueden sustituir de manera directa al halón con las instalaciones actuales. Se debería hacer algunos cambios en el sistema evaluando, y potencialmente modificando, la configuración de acuerdo a los siguientes elementos que se incluyen a continuación:

- Estado de la instalación actual y de cada elemento que la compone.
- Cañerías.
- Boquillas.
- Tubos.
- Compatibilidad del nuevo agente con el diseño de distribución.
- Si se valora la ampliación de la instalación.
- El espacio de almacenamiento que necesita el nuevo agente para proteger todo el volumen.

Este estudio se podría complementar con los siguientes trabajos futuros:

- Analizando muchos más agentes extintores para aumentar la comparativa.
- Haciendo un análisis químico de los compuestos para ver más propiedades de cada uno de ellos y ver con más detalle en que situaciones actúan mejor.
- Calculando la importancia e intensidad de contaminación que producen los números vistos en el apartado de resultados, valorando así rangos válidos de aceptación de un agente.
- Construyendo un modelo CFD de las distintas partes de la aeronave para estudiar cómo se distribuye el agente extintor por todo el volumen a proteger.

REFERENCIAS

1. **Antonio Nicolás Bozzani. 2009.** Protección contra incendios. Seguridad, prevención y extinción. [En línea] noviembre de 2022. <http://www.mailxmail.com/curso-proteccion-incendios-seguridad-prevencion-extincion>
2. **Asociación española de laboratorios de fuego.** El triángulo del fuego. [En línea] noviembre de 2022. <http://www.aelaf.es/el-triangulo-del-fuego/>
3. **Educaycrea.com. 2014.** Propagación del calor: formas y ejemplos. [En línea] noviembre de 2022. <https://www.educaycrea.com/2014/04/propagacion-del-calor-formas-y-ejemplos/>
4. **Insulationstop.com.** What is a radiant barrier and how do they work? [En línea] noviembre de 2022. <http://insulationstop.com/what-is-a-radiant-barrier/>
5. **Ricardo Galván Hernández.** El mundo de la protección contra incendio. [En línea] noviembre de 2022. <https://www.prosegsa.com.mx/2020/11/25/tipos-de-fuego/>
6. **¿Por qué se destruye la capa de ozono? 2022.** Christina Nunez (National Geographic). 16 de septiembre de 2022. [En línea] noviembre de 2022. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/por-que-se-destruye-la-capa-de-ozono>
7. **Entrevista a Sherwood Rowland (Nobel de química 1995).** Pérdida de ozono y calentamiento global. 1 de enero del 2000. Basado en un artículo de Lisbeth Fog publicado en Lectura Dominicales de El Tiempo (Colombia). [En línea] noviembre de 2022. <https://estrucplan.com.ar/perdida-de-ozono-y-calentamiento-global/>
8. **El agujero de ozono de la Antártida es el 13.º más grande y persistirá hasta noviembre. 2021.** Sofie Bates (Equipo de Noticias de Ciencias de la Tierra de la NASA). 2 de noviembre de 2021. [En línea] noviembre de 2022. <https://ciencia.nasa.gov/el-actual-agujero-de-ozono-de-la-antartida-uno-de-los-m%C3%A1s-grandes>
9. **Profesor en línea.** Ozono y clorofluorocarbonos (CFC). [En línea] noviembre de 2022. https://www.profesorenlinea.cl/Quimica/Ozono_y_CFC.htm
10. **Organización de las Naciones Unidas.** Objetivos de Desarrollo Sostenible. [En línea] noviembre de 2022. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
11. **Sistema de detección de fuego y extinción. 28 de febrero de 2016.** [En línea] noviembre de 2022. <https://greatbustardsflight.blogspot.com/2016/02/sistema-de-deteccion-de-fuego-y.html>

12. **Manual del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la Capa de Ozono. Decimotercera edición (2020).** ONU, programa para el medio ambiente. Secretaría del Ozono.
13. **Monitoring and Evaluation Technical Guidelines for Ozone Depleting Substances (ODS) Phaseout Investment Projects.** The World Bank Group. [En línea] noviembre de 2022. <http://web.worldbank.org/archive/website00673/WEB/OTHER/HALONEXT.HTM>
14. **Halon sector: Executive Committee Decisions.** The World Bank Group. [En línea] noviembre de 2022. <http://web.worldbank.org/archive/website00673/WEB/OTHER/HALONSEC.HTM>
15. **REGLAMENTO (CE) nº 1005/2009 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 16 de septiembre de 2009 sobre las sustancias que agotan la capa de ozono.** Diario Oficial de la Unión Europea. 31 de octubre de 2009.
16. **Halon replacement in the aviation industry.** November 2019. European Aviation Safety Agency.
17. **REGLAMENTO (UE) 2017/605 DE LA COMISIÓN de 29 de marzo de 2017.** Diario Oficial de la Unión Europea. 30 de marzo de 2017.
18. **REGLAMENTO (UE) Nº 748/2012 DE LA COMISIÓN de 3 de agosto de 2012.** Diario Oficial de la Unión Europea. 21 de agosto de 2012.
19. **FAA Halon ARC Final Report: Findings & Recommendations.** Halon Replacement Aviation Rulemaking Committee. 1 de diciembre de 2014.
20. **Hot topic: Clean Sky's 'Environmentally friendly fire protection' system.** Clean Sky 2 Joint Undertaking. 2019.
21. **Pathak, A.; Norrefeldt, V.; Pschirer, M.** Validation of a Simulation Tool for an Environmentally Friendly Aircraft Cargo Fire Protection System. *Aerospace* 2021, 8, 35.
22. **John W. Reinhardt.** Minimum Performance Standard for Aircraft Cargo Compartment Halon Replacement Fire Suppression Systems (2012 Update). U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration.
23. **Todd M. Hetrick, Ali S. Rangwala.** Analysis of Hold Time Models for Total Flooding Clean Extinguishing Agents. Department of Fire Protection Engineering Worcester Polytechnic Institute.
24. **Y. F. Li, W. K. Chow.** A Zone Model in Simulating Water Mist Suppression on Obstructed Fire. *Heat Transfer Engineering*, volume 27, 2006 – Issue 10, pages 99-115.
25. **Jukka Vaari.** A transient one-zone computer model for total flooding water mist fire suppression in ventilated enclosures. *Fire Safety Journal*, volume 37, Issue 3 de abril de 2002, pages 229-257.
26. **S. S. Yoon, H. Y. Kim, J. C. Hewson, J. M. Suo-Anttila, D. J. Glaze & P. E. DesJardin (2007).** A Modeling Investigation of Suppressant Distribution from a

- Prototype Solid-Propellant Gas-Generator Suppression System into a Simulated Aircraft Cargo Bay, *Drying Technology*, 25:6, 1011-1023, DOI: 10.1080/07373930701396410.
27. **A. Pathak, V. Norrefeldt, A. Lemouedda & G. Grün.** The Modelica Thermal Model Generation Tool for Automated Creation of a Coupled Airflow, Radiation Model and Wall Model in Modelica. Conference: the 10th International Modelica Conference, March 10-12, 2014, Lund, Sweden. March 2014.
 28. **V. Norrefeldt, G. Grün.** VEPZO—Velocity Propagating Zonal Model for the prediction of airflow pattern and temperature distribution in enclosed spaces. 9th International MODELICA Conference, Munich, Germany. November 2012. DOI:10.3384/ecp12076279.
 29. **A. Pathak, V. Norrefeldt & G. Grün (2012).** Modelling of Radiative Heat Transfer in Modelica with a Mobile Solar Radiation Model and a View Factor Model.
 30. **Apostolakis et al. (1995).** Risk-based spacecraft fire safety experiments. *Reliability Engineering & System Safety*, volume 49, Issue 3, 1995, pages 275-291.
 31. **Spyrou, Kostas J. & Koromila, Ioanna A., 2020.** "A risk model of passenger ship fire safety and its application," *Reliability Engineering and System Safety*, Elsevier, vol. 200(C).
 32. **Arshi et al. (2010).** Coupling CFAST fire modeling and SAPHIRE probabilistic assessment software for internal fire safety evaluation of a typical TRIGA research reactor. *Reliability Engineering & System Safety*, volume 95, Issue 3, March 2010, pages 166-172.
 33. **Chen Z, Fielding JP, 2018.** A zonal safety analysis methodology for preliminary aircraft systems and structural design, *The Aeronautical Journal*, Volume 122, Issue 1255, September 2018, pp. 1330-1351
 34. **A. Dinesh, C. M. Benson, P. G. Holborn, S. Sampath & Y. Xiong.** Performance evaluation of nitrogen for fire safety application in aircraft. *Reliability Engineering & System Safety*, volume 202 (October 2020).
 35. **NTP 666: Sustitutos y alternativas para los halones de extinción.** Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. España.
 36. **Catálogo Extinción Automática.** Safety Solgar, S.L.
 37. **Fleet Team Digest 737NG-FTD-26-11001.** 25 de agosto de 2022. Boeing.
 38. **NOTICE OF PROPOSED AMENDMENT (NPA) NO 2011-14.** 8 de agosto de 2011. EASA.
 39. **Lavatory Waste Bin Extinguisher.** Kidde, a part of Collins Aerospace. [En línea] marzo de 2023. <https://kiddetechnologies.com/products/detail/lavatory-waste-bin-extinguisher>