



UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

El hidrógeno en la aviación

Pedro José Bautista García

Curso 2021-2022

Título: El hidrógeno en la aviación.

Autor: Pedro José Bautista García

Tutor: Álvaro Rodríguez Sanz

Titulación: Máster Ingeniería Aeroespacial

Curso: 2023-2024



RESUMEN

El hidrógeno se posiciona como un vector energético además de uno de los métodos de almacenamiento energético con mayor potencial impulsado por la Unión Europea. Asimismo, permite disminuir de manera más que notable las emisiones de gases de efecto invernadero que derivan del uso de combustibles fósiles.

El presente trabajo se centrará en el hidrógeno verde (explicado y diferenciado de los demás tipos de hidrógeno más adelante), a partir del uso de energía obtenida mediante fuentes renovables. Dicha energía se aprovechará en un electrolizador, para generar hidrógeno a través del proceso de electrólisis del agua.

Se desarrollarán diferentes aspectos relacionados con el entorno aeroportuario, concretamente para tres elementos fundamentales: la infraestructura, con el objetivo de basar su funcionamiento en el hidrógeno; las aeronaves, con la finalidad de mostrar los nuevos proyectos de aeronaves que estén propulsadas por hidrógeno y el handling aeroportuario impulsado por pila de combustible.

Este cambio no puede realizarse de manera repentina, sino que debe producirse de manera paulatina con el crecimiento de la tecnología y la inversión que ayude a la misma. Es evidente que la inversión requerida en un aeropuerto de grandes dimensiones como es el caso de Madrid-Barajas o Barcelona sería notablemente mayor a un aeropuerto más reducido como el de Valencia.

Se buscará también el objetivo de evaluar la rentabilidad de los proyectos y también se analizará la reducción que esto supondría en términos de emisiones de gases de efecto invernadero con la producción y uso del hidrógeno verde generado.

RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo aborda la posibilidad de integrar el hidrógeno como una fuente de combustible sostenible en el sector de la aviación, centrándose en tres aspectos clave: infraestructura, modificación de aeronaves y vehículos de manejo en tierra. Al evaluar las implicaciones ambientales y económicas, el estudio examina los desafíos asociados con la transición al hidrógeno líquido y su impacto en los sistemas existentes. Los principales hallazgos son:

- **Transición de Infraestructura:**

La adopción de hidrógeno líquido requiere alteraciones significativas en la infraestructura aeroportuaria, con especial atención a los protocolos de seguridad, procesos de repostaje y mecanismos de almacenamiento.

- **Modificación de Aeronaves:**

El cambio al hidrógeno como combustible implica modificaciones notables en las aeronaves existentes, afectando la masa alar, la aerodinámica y la reubicación del almacenamiento de combustible.

- **Vehículos de Manejo en Tierra:**

La adaptación de vehículos de manejo en tierra al hidrógeno introduce incertidumbres en la integración tecnológica y plantea desafíos para estimar los costos asociados.

Si bien la integración del hidrógeno en la aviación promete un futuro más sostenible y una reducción sustancial de las emisiones de CO₂, el informe destaca la necesidad de abordar desafíos en la modificación de aeronaves y la adaptación de vehículos en tierra.

El camino por seguir requiere esfuerzos colaborativos en el desarrollo tecnológico, la renovación de la infraestructura y la capacitación de la fuerza laboral. Este informe proporciona una visión integral para las partes interesadas que deseen comprender las complejidades y los beneficios potenciales de la transición a sistemas basados en hidrógeno en la aviación.

Agradecimientos

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a mi familia por su continuo respaldo durante este proyecto. Agradezco especialmente a mis padres por ser una fuente constante de apoyo y motivación.

A mi tutor, Álvaro, le estoy agradecido por su orientación y dedicación. Su experiencia y paciencia han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

También agradezco a todos aquellos que, con sus palabras de aliento y apoyo, contribuyeron al éxito de este proyecto. Cada gesto y muestra de colaboración ha sido invaluable.

Este logro no habría sido posible sin el esfuerzo colectivo, y quiero reconocer a todos los que formaron parte de este viaje. Gracias por enriquecer esta experiencia de manera significativa.

Índice

RESUMEN	5
RESUMEN EJECUTIVO.....	6
1. Introducción.....	13
1.1 Problema de las emisiones de gases de efecto invernadero	13
1.2 Objetivos del proyecto	15
1.3 El Hidrógeno	16
2. Actualidad y análisis del H2.....	19
2.1 Aplicaciones del Hidrógeno en la industria aeroespacial.....	19
2.2 El contexto de los aeropuertos en el sector de la aviación y el rol de los aeropuertos en la descarbonización del sector.....	21
2.3 El aeropuerto como hub de hidrógeno	22
2.4 Problemática respecto al almacenamiento de energía renovable	24
2.5 El hidrógeno en la aviación	26
2.5.1 El hidrógeno	28
2.5.2 Concepto de vector energético.....	32
2.5.3 Tipos de hidrógeno.....	34
2.5.4 Formas de obtención del hidrógeno	35
2.5.5 Formas de transporte del hidrógeno	41
2.5.6 Seguridad y normativa	47
3. Implementación del hidrógeno en el mundo de la aviación	49
3.1 Infraestructura aeroportuaria	49
3.1.1 Estaciones de recarga.....	50
3.1.2 Tuberías y conducciones	54
3.1.3 Áreas de almacenamiento.....	57
3.1.4 Infraestructura fotovoltaica	65
3.1.5 Integración con infraestructura existente.....	67
3.1.6 Capacitación del personal	71
3.1.7 Coordinación con aerolíneas y fabricantes	72
3.1.8 Desarrollo de normativa y estándares	73

3.1.9 Monitorización y mantenimiento	74
3.1.10 Proyectos piloto y ejemplos prácticos	75
3.2 Hidrógeno en aeronaves	77
3.2.1 Propulsión con motores de hidrógeno.....	77
3.2.2 Diseño optimizado de aeronaves	83
3.2.3 Innovación en materiales	89
3.2.4 Integración de tecnologías híbridas	90
3.3 Handling impulsado por hidrógeno.....	91
3.3.1 Equipamiento y vehículos de handling impulsados por hidrógeno	91
3.3.2 Estaciones de recarga.....	98
3.3.3 Tecnologías de almacenamiento de hidrógeno	99
3.3.4 Procesos de mantenimiento e inspección de los vehículos	100
3.3.5 Capacitación del personal	101
3.3.6 Certificaciones y normativa.....	103
3.3.7 Integración con sistemas existentes	104
3.3.8 Gestión de residuos y sostenibilidad.....	108
3.3.9 Innovaciones tecnológicas en el handling.....	109
3.3.10 Evaluación en el largo plazo	110
4. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	112
4.1 Conclusión	112
4.2 Líneas futuras	114
PRESUPUESTO	116
REFERENCIAS.....	121

Figuras

FIGURA 1 REPRESENTACIÓN DE LAS EMISIONES GLOBALES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR SECTOR.....	14
FIGURA 2. POSIBLES HORIZONTES SEGÚN EL DESARROLLO DE LA INDUSTRIA EN LOS PRÓXIMOS AÑOS.....	15
FIGURA 3. ESPACIO ORBITAL DE UN ÁTOMO DE HIDRÓGENO A TRAVÉS DE UN MICROSCOPIO CUÁNTICO [5].	29
FIGURA 4. COMPARACIÓN LLAMARADA DE HIDRÓGENO VS GASOLINA [7].	31
FIGURA 5. DIAGRAMA P-T DEL HIDRÓGENO [8].	32
FIGURA 6. PROCESO DE REFORMADO DEL GAS NATURAL [3].	36
FIGURA 7. PROCESO DE REFORMADO DEL GAS NATURAL CON CAPTURA DE CO2 [3].	37
FIGURA 8. TIPOS DE ELECTROLIZADORES Y PROCESOS [3].	39
FIGURA 9. DETALLE DE FUNCIONAMIENTO DE ELECTROLIZADOR PEM [3].	39
FIGURA 10. FORMAS DE TRANSPORTE DEL HIDRÓGENO [9].	41
FIGURA 11. UMBRALES DE RENTABILIDAD EN EL TRANSPORTE DE HIDRÓGENO [9].	43
FIGURA 12. TRANSPORTE DE H2 EN FUNCIÓN DE DISTANCIA RECORRIDA Y VOLUMEN TRANSPORTADO [9].	43
FIGURA 13. TRANSPORTE DESDE MARRUECOS [9].	44
FIGURA 14. TRANSPORTE DESDE SUDAMÉRICA (CHILE) [9].	44
FIGURA 15. TRANSPORTE DESDE ORIENTE MEDIO (ARABIA SAUDÍ) [9].	45
FIGURA 16. USOS DEL AMONIACO LIMPIO [9].	46
FIGURA 17. PODER EXPLOSIVO DEL HIDRÓGENO FRENTE A OTROS COMBUSTIBLES.	47
FIGURA 18. HIDROGENERAS EXISTENTES EN LA UE.....	52
FIGURA 19. IMAGEN DE HIDROGENERA.....	53
FIGURA 20. TIPOS DE TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE H2 GASEOSO SEGÚN LAS ESPECIFICACIONES REQUERIDAS [13].	59
FIGURA 21. PROTOTIPO HYDROGEN DEPOT [14].	60
FIGURA 22. TANQUE CRIOGÉNICO DE HIDRÓGENO (ALMACENAMIENTO LÍQUIDO) [15].	61
FIGURA 23. UBICACIÓN DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO H2 EN AVIÓN MEDIO-LARGO ALCANCE [16].	63
FIGURA 24. UBICACIÓN DE TANQUE DE ALMACENAMIENTO H2 EN AVIÓN DE CORTO ALCANCE [17].	64
FIGURA 25. UBICACIÓN PARQUE SOLAR EN AEROPUERTO ADOLFO SUÁREZ MADRID-BARAJAS [18].	65
FIGURA 26. CRITERIOS PARA DISTANCIAS ENTRE PANELES Y CON EL BORDE DE LA CUBIERTA [19].	66
FIGURA 27. PROTOTYPE PIPE-WITHIN-A-PIPE [14].	70
FIGURA 28. SECCIÓN DETALLADA DE UN MOTOR TURBOPROP [24].	78
FIGURA 29. COMPARACIÓN DE RENDIMIENTO PROPULSIVO PARA VARIAS PLANTAS PROPULSORA [25].	78
FIGURA 30. IMÁGENES ATR VS A350 [26].	79
FIGURA 31. ESQUEMA DEL CICLO DEL HIDRÓGENO DESDE EL TANQUE (LIQUIDO) HASTA LA COMBUSTIÓN [27].	80
FIGURA 32. CICLO DEL HIDRÓGENO EN AERONAVE [28].	81
FIGURA 33. CONCEPTO TURBOFÁN ZEROE POR AIRBUS [29].	84
FIGURA 34. CONCEPTO ALA MIXTA ZEROE POR AIRBUS [29].	85
FIGURA 35. CONCEPTO TURBOHÉLICE ZEROE POR AIRBUS [29].	85
FIGURA 36. CONCEPTO A380 MSN1 PARA TESTEAR TECNOLOGÍAS DE HIDRÓGENO [29].	86
FIGURA 37. PROTOTIPO DEL DIRIGIBLE DE TRANSPORTE DE CARGA E HIDRÓGENO [14].	87
FIGURA 38. PROTOTIPO 787-10 DREAMLINER [30].	87
FIGURA 39. TRACTOR PUSHBACK [31].	92
FIGURA 40. CAMIÓN DISPENSADOR DE COMBUSTIBLE [31].	92
FIGURA 41. CAMIÓN DE BOMBEO DE COMBUSTIBLE DESDE LA RED [20].	93
FIGURA 42. CAMIÓN DISPENSADOR DE COMBUSTIBLE [31].	93
FIGURA 43. CAMIÓN DE DESHIELO [31].	94
FIGURA 44. ESCALERA MÓVIL [31].	94
FIGURA 45. VEHÍCULO TRANSPORTE PMRS [31].	94
FIGURA 46. JARDINERA [31].	95

FIGURA 47. TRACTOR AUXILIAR [31].....	95
FIGURA 48. CINTA TRANSPORTADORA [31].....	95
FIGURA 49. VEHÍCULOS CONVENCIONALES PROPUESTOS [33].....	96
FIGURA 50. ESQUEMA VEHÍCULO PROPULSADO POR HIDRÓGENO [32].....	97
FIGURA 51. DIÁMETRO DE SEGURIDAD DURANTE EL REPOSTAJE DE HIDRÓGENO [20].....	106
FIGURA 52. DIÁMETRO DE SEGURIDAD DURANTE EL REPOSTAJE DE HIDRÓGENO [20].....	115

Tablas

TABLA 1. PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO FRENTE A COMBUSTIBLES CONVENCIONALES.....	18
TABLA 2. PODER ENERGÉTICO DEL HIDRÓGENO FRENTE A OTROS COMBUSTIBLES [6].....	30
TABLA 3. PARÁMETROS CRÍTICOS DEL HIDRÓGENO [6].	31
TABLA 4. TIPOS DE HIDRÓGENO (ELABORACIÓN PROPIA).....	34
TABLA 5. PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO FRENTE A COMBUSTIBLES CONVENCIONALES [11].	53
TABLA 6. PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO FRENTE A COMBUSTIBLES CONVENCIONALES [20].	68
TABLA 7. PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO FRENTE A COMBUSTIBLES CONVENCIONALES (ELABORACIÓN PROPIA).	69
TABLA 8. COMPARACIÓN AMBOS VEHÍCULOS (ELABORACIÓN PROPIA) [33].	96
TABLA 9. PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO FRENTE A COMBUSTIBLES CONVENCIONALES [20].	107
TABLA 10. SUMA PRECIO HIDROGENERAS PARA TRES CASOS [10].	116
TABLA 11. PRESUPUESTO TUBERÍAS COMBUSTIBLE TRADICIONAL PARA TRES CASOS [34].	116
TABLA 12. PRESUPUESTO TUBERÍAS HIDRÓGENO EN TRES CASOS [35].	117

1. Introducción

1.1 Problema de las emisiones de gases de efecto invernadero

Cuando observamos un avión surcando el cielo, rara vez reflexionamos sobre los complejos procesos químicos que lo mantienen en vuelo. La aviación representa una danza entre la creatividad humana y la ciencia, y en este contexto, la química desempeña un papel fundamental, trabajando de manera discreta pero esencial para mantener todo en equilibrio.

Desde la formulación de combustibles hasta la composición de materiales y la seguridad de los pasajeros, la química constituye el fundamento del conocimiento que nos permite volar. En la actualidad, esta disciplina impulsa a la industria de la aviación hacia nuevos horizontes.

El transporte aéreo sería impensable sin la contribución de la química, que abarca desde materiales y medidas de seguridad hasta combustibles y gases, haciendo que la aviación sea posible.

La aviación y el sector aeroespacial contribuyen de manera significativa a las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global. La aviación civil es responsable de alrededor del 3,5% del cambio climático antropogénico. Esta cifra incluye tanto los efectos inducidos del dióxido de carbono (CO₂) como no CO₂.

Las principales emisiones de la aviación son el dióxido de carbono (CO₂), el óxido de nitrógeno (NO_x), los óxidos de azufre (SO_x) y el hollín. El CO₂ es el gas de efecto invernadero más importante, y representa alrededor del 80% de las emisiones de la aviación.

Estas emisiones de la aviación están aumentando rápidamente, debido al crecimiento de la demanda de transporte aéreo. En 2022, las emisiones de la aviación fueron de 940 millones de toneladas de CO₂, un aumento del 22% respecto a 2021.

Esta figura proporcionará una perspectiva gráfica de la escala de las emisiones de la aviación en comparación con otras industrias clave, como la generación de energía y la agricultura [1]:

Las emisiones globales de gases de efecto invernadero fueron 49,4 mil millones de toneladas de CO₂eq.

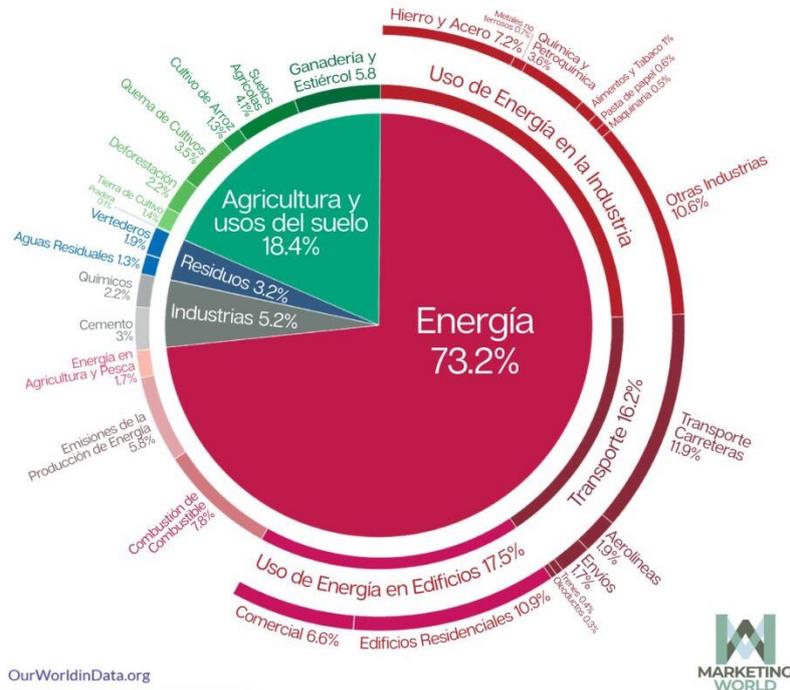


Figura 1 Representación de las emisiones globales de gases de efecto invernadero por sector.

1.2 Objetivos del proyecto

Se espera que las emisiones de la aviación continúen aumentando en el futuro. Según la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), las emisiones de la aviación podrían alcanzar los 1.500 millones de toneladas de CO₂ en 2030 y los 2.700 millones de toneladas de CO₂ en 2050.

Estas conclusiones dependen del camino que se tome a partir de ahora, siendo clave el análisis de los posibles escenarios para la descarbonización del sector [2]:

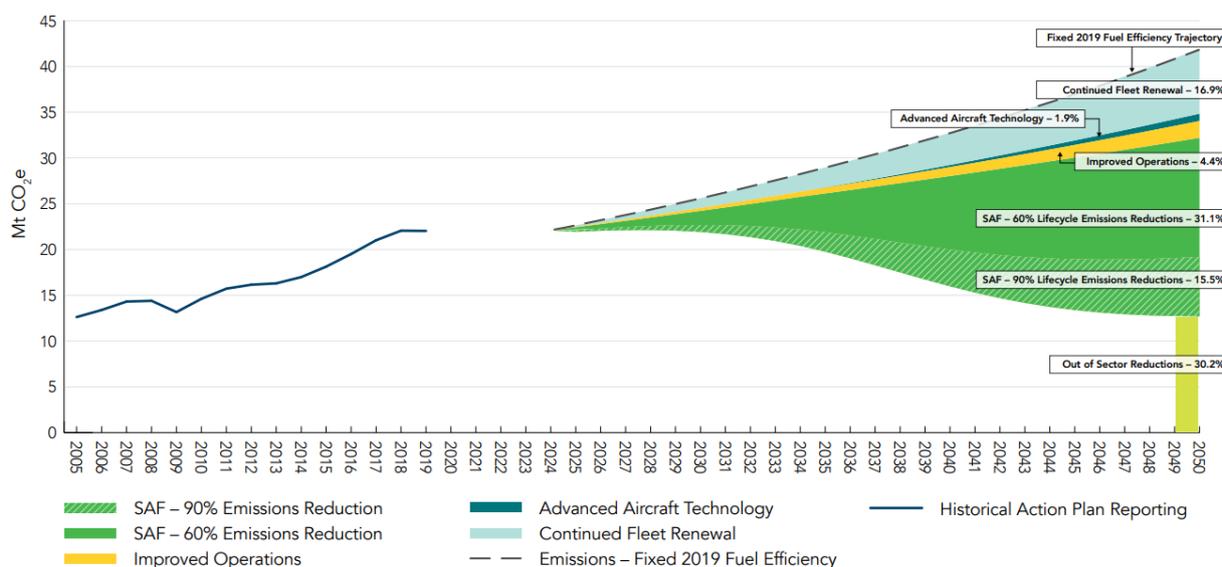


Figura 2. Posibles horizontes según el desarrollo de la industria en los próximos años.

Para reducir las emisiones en el sector de la aviación, se están desarrollando una serie de tecnologías y medidas. Entre ellas se incluyen:

- Motores más eficientes.
- Uso de combustibles de aviación sostenibles.
- Optimización de las operaciones aéreas.

Sin embargo, estas medidas no serán suficientes para evitar que las emisiones de la aviación sigan aumentando. Por este motivo será necesario adoptar medidas más drásticas como la imposición de un precio al carbono para la aviación.

En el contexto de la creciente conciencia sobre el impacto ambiental de la aviación y el sector aeroespacial, resulta fundamental abordar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con estas industrias. Como se mencionó anteriormente, la aviación contribuye significativamente a las emisiones globales, y aunque se han realizado esfuerzos para mejorar la eficiencia y explorar alternativas, la necesidad de soluciones sostenibles sigue siendo apremiante.

En este sentido, este Trabajo Fin de Máster se enfocará en una innovadora perspectiva para mitigar las emisiones en la aviación: **el hidrógeno**.

1.3 El Hidrógeno

El **hidrógeno verde**, generado por electrólisis con energías renovables, se presenta como un elemento químico innovador con el potencial de revolucionar la aviación. Este avance abre la puerta a vuelos sin emisiones de carbono, ofreciendo una perspectiva futura, aunque aún con mucho recorrido por delante.

Este vínculo entre la química y la aviación, aparentemente inadvertido, se extiende más allá de la superficie y se convierte en un componente esencial para un vuelo más sostenible y eficiente, permitiéndonos explorar con seguridad los cielos.

A lo largo de estos últimos años, tanto en España como en la Unión Europea, se ha desarrollado una normativa que da soporte a la industria creciente del hidrógeno, concretamente la ligada al hidrógeno verde.

A través del propósito de respaldar este desarrollo con la utilización de energía renovable, en este trabajo se presenta un análisis y un estudio de la industria del hidrógeno en el ámbito de aviación, y se estudian varias alternativas posibles a implementar para cumplir con esta transición. Se abordarán aspectos clave como la producción, el almacenamiento o la seguridad referentes a esta implantación.

Además, al encontrarnos en España, nos situaremos en un escenario en el que favorablemente se utiliza la energía fotovoltaica para poder cumplir con los requisitos para ser considerado hidrógeno verde y lograr reducir notablemente las emisiones de CO₂ por la gran cantidad de horas de sol de las que se dispone, aunque también es adecuado el uso de otro tipo de energías.

En el caso de querer trasladarlo a otras zonas, la elección de energías como la eólica, hidroeléctrica o geotérmica podría ser la más adecuada para satisfacer la demanda energética de manera sostenible.

Y aunque es cierto que el planteamiento de energía fotovoltaica puede resultar en un hidrógeno más costoso debido a la propia tecnología, cabe destacar que la producción del hidrógeno sigue siendo una alternativa confiable para la descarbonización de la economía mundial.

El descubrimiento del hidrógeno como combustible se remonta al año 1766 cuando por primera vez **Henry Cavendish** reconoció el hidrógeno como una sustancia gaseosa y la describió como “**aire inflamable**” en la que su combustión genera agua.

Más tarde, en el año 1783, Antoine Lavoisier le puso el nombre de hidrógeno tras comprobar junto a Laplace que el descubrimiento de Cavendish era cierto, y que en la combustión se generaba agua.

Su utilización se remonta desde finales del Siglo XIX y principios del Siglo XX, empleado en las ciudades como “Gas Ciudad”, que consistía en una mezcla de 45-65% H₂, Y 35-45% Metano (CH₄) [3].

Posteriormente en el Siglo XX y en la actualidad se empezó a utilizar como combustible de amplio uso en la industria petroquímica en la que se obtiene en los primeros pasos de la destilación y se utiliza en la propia planta como fuente de calor.

Adicionalmente es la materia prima base para la producción de amoníaco (NH_3), elemento a partir del cual se producen los fertilizantes. También ha sido empleado como combustible para los cohetes espaciales.

El hidrógeno actualmente ha adquirido un papel fundamental en el programa de las fuentes de energía sustentable, y acompañado con el aumento de la electrificación a nivel mundial, es una variante más para tener en cuenta en el medio-largo plazo. Además, si añadimos la capacidad del hidrógeno para almacenar grandes volúmenes de energía de fuentes renovables durante periodos largos de tiempo, se transforma en un componente fundamental para alcanzar la sostenibilidad energética a largo plazo.

La producción y almacenamiento de hidrógeno verde (que se definirá posteriormente), se contempla como una solución para cumplir con las metas de descarbonización y equilibrio climático para el año 2050. Todo esto acompañado con los avances en investigación, tecnologías y métodos de transporte y almacenamiento, lo convierten en una alternativa realmente factible para su implementación en diferentes sectores.

En este trabajo nos vamos a centrar en el sector del transporte, concretamente en el apartado de aviación.

Es por ello por lo que tendremos que focalizarnos en ampliar la cadena de valor del hidrógeno, desde su obtención hasta su uso final. Esto incluye el mejorar la producción de este, su almacenamiento, transporte y distribución, así como su uso en otros sectores.

Actualmente en España ya se está dando soporte tanto del sector privado como del público a la producción de hidrógeno. Aunque si lo miramos con perspectiva estamos muy atrasados respecto a otros países como Japón, EEUU, Canadá o China.

Es por ello esencial la producción de energía renovable para garantizar la demanda continua. Este camino se debe de lograr desarrollando tecnologías de producción y almacenamiento de energía eléctrica cada vez más eficientes y económicas.

Por lo tanto, el hidrógeno se convierte en un elemento clave para lograr la descarbonización y equilibrio climático, por lo que serán de vital importancia los métodos de producción y de almacenamiento de energía que permita una garantía de suministro e independencia en los diferentes ámbitos donde se pueda desarrollar.

Se presenta a continuación una tabla con las principales propiedades del hidrógeno en comparación con otras fuentes de energía [3]:

Propiedad	H2	Gas Natural	Queroseno
Densidad (gas)	0.089 kg/m ³ (0°, 1 atm)	0.737 kg/m ³ (15°C, 1 atm)	—
Densidad (líquido)	70.8 kg/m ³ (-253°C, 1 atm)	431 kg/m ³ (-161°C, 1 atm)	780 kg/m ³ (15°C, 1 atm)
Punto Ebullición (1 atm)	-253°C	-160°C	150-250°C, 1atm
Densidad Energética (masa)	120 MJ/kg	48 MJ/kg	43.4 MJ/kg
Densidad Energética gas (volumen)	10.8 MJ/m ³	35.3 MJ/m ³	—
Densidad Energética líquido (volumen)	9.13 MJ/m ³	20.7 MJ/m ³	33.8 MJ/m ³

Tabla 1. Propiedades del hidrógeno frente a combustibles convencionales

El hidrógeno ha emergido como una opción prometedora para descarbonizar las operaciones aéreas, tanto en tierra como en el aire. Este trabajo explorará cómo la implementación del hidrógeno en la aviación puede ofrecer soluciones prácticas y sostenibles, examinando tanto los desafíos técnicos como las posibles ventajas medioambientales.

A medida que la industria aeroespacial avanza hacia un futuro más sostenible, el hidrógeno se presenta como una tecnología clave para reducir las emisiones y establecer una base para la aviación del mañana. En las siguientes secciones, se abordarán los fundamentos técnicos, los avances actuales y las perspectivas futuras en la aplicación del hidrógeno en la aviación, delineando así el terreno para una discusión detallada y exhaustiva.

En conclusión, la aviación y el sector aeroespacial son un importante contribuyente al cambio climático. Es necesario adoptar medidas para reducir las emisiones de la aviación, de lo contrario, este sector podría convertirse en un obstáculo para el cumplimiento de los objetivos climáticos internacionales.

2. Actualidad y análisis del H2

2.1 Aplicaciones del Hidrógeno en la industria aeroespacial

Como ya se ha comentado en la introducción, la utilización del hidrógeno en la industria aeroespacial ha ganado interés debido a sus propiedades únicas y su potencial para abordar desafíos ambientales y energéticos.

Es importante mencionar que se van a nombrar diversas alternativas, aunque la atención del trabajo irá dirigida exclusivamente en algunas en particular. Este enfoque selectivo permitirá un análisis más detallado y exhaustivo de las alternativas más prometedoras en el contexto de nuestro trabajo.

Bien es cierto que la inversión e investigación en estas alternativas no solo tienen potencial de transformar el sector aeroespacial, sino que también podrían evolucionar y extenderse a aplicaciones más cotidianas y en otros sectores industriales. Estamos hablando de desarrollo de vehículos terrestres alternativos a las posibilidades de hoy en día, avances en el almacenamiento energético, desarrollo de la industria marítima, introducción de la tecnología en entornos residenciales o en sectores como la agricultura, etc.

A continuación, se exploran diversas aplicaciones en la industria aeroespacial que nos indican la capacidad de cumplimiento de estos retos.

- **Propulsión de Cohetes:**

Ventajas: El hidrógeno líquido es un propulsor eficiente que ofrece un alto impulso específico.

Ejemplo: El cohete Saturno V de la NASA utilizó hidrógeno líquido en su etapa superior.

- **Aviación:**

Propulsión de Aeronaves: El hidrógeno puede ser utilizado como combustible para aviones, reduciendo emisiones y dependencia de combustibles fósiles.

Ejemplo: Proyectos de aeronaves propulsadas por hidrógeno, como el concepto de avión de Airbus con cero emisiones.

- **Infraestructuras de suministro y transporte:**

Desarrollo de estaciones de repostaje de hidrógeno y sistemas de transporte para su distribución. Se ha de implementar este tipo de infraestructuras que respalden la movilidad y distribución eficiente del hidrógeno, facilitando su adopción a nivel nacional e internacional.

Este punto es clave para esta tecnología, pues es fundamental para facilitar su aplicación en diversas áreas.

- **Dirigibles y Globos Aerostáticos:**

Uso como Gas de Elevación: El hidrógeno ligero puede utilizarse en dirigibles para proporcionar elevación.

Ejemplo: Aplicaciones históricas como el Hindenburg, aunque su seguridad ha sido cuestionada.

- **Generación de Energía a Bordo:**

Celdas de Combustible: El hidrógeno alimenta celdas de combustible para generar electricidad y alimentar sistemas a bordo.

Ejemplo: Prototipos de aeronaves no tripuladas con celdas de combustible.

- **Materiales Ligeros y Estructuras:**

Tanques de Almacenamiento: El hidrógeno se puede utilizar en materiales ligeros para tanques de almacenamiento.

Ejemplo: Desarrollo de tanques compuestos de fibra de carbono.

- **Exploración Espacial:**

Combustible para Propulsores: El hidrógeno ha sido utilizado como combustible en cohetes espaciales.

Ejemplo: Aplicación en misiones espaciales, como el transbordador espacial.

- **Investigación y Desarrollo:**

Prototipos y Conceptos Futuristas: Numerosas investigaciones exploran el potencial del hidrógeno en aeronaves y tecnologías aeroespaciales avanzadas.

Ejemplo: Proyectos de investigación de la NASA y otras agencias espaciales.

- **Reducción de Emisiones y Sostenibilidad:**

Enfoque Ambiental: El hidrógeno puede contribuir a reducir la huella de carbono de la industria aeroespacial.

Ejemplo: Compromisos de la industria para adoptar tecnologías más sostenibles.

Este resumen abarca una variedad de aplicaciones del hidrógeno en la industria aeroespacial, desde la propulsión de cohetes hasta la aviación sostenible y la investigación espacial. Cada área presenta oportunidades y desafíos específicos, marcando un camino hacia una industria más eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

En el presente trabajo de investigación se centrará específicamente en profundizar en el sector de la aviación, con un enfoque más detallado en el ámbito aeroportuario. Exploraremos a fondo las aplicaciones del hidrógeno centrándonos especialmente en cómo esta tecnología puede transformar los aeropuertos y sus operaciones.

A través de un análisis detallado de la viabilidad y las implicaciones técnicas, se buscará comprender cómo la implementación de estas tecnologías basadas en el hidrógeno puede contribuir a la eficiencia y sostenibilidad en el sector aeroportuario, reduciendo emisiones y mejorando la gestión de recursos. Este enfoque selectivo permitirá una evaluación exhaustiva de las oportunidades y desafíos asociados con la introducción del hidrógeno en una de las áreas más críticas de la industria aeroespacial.

2.2 El contexto de los aeropuertos en el sector de la aviación y el rol de los aeropuertos en la descarbonización del sector

En el ámbito de la aviación, los aeropuertos son elementos clave para la operación eficiente del transporte aéreo. Funcionan como puntos de conexión entre diversos destinos y actúan como puertas de entrada a las redes de transporte aéreo a nivel nacional e internacional. El contexto aeroportuario abarca aspectos como el crecimiento del tráfico aéreo, la infraestructura, las regulaciones, la seguridad, la experiencia del pasajero y la sostenibilidad.

Con el crecimiento del tráfico aéreo impulsado por la globalización y la movilidad, los aeropuertos enfrentan desafíos en términos de expansión, transformación y mejora de la infraestructura para satisfacer la creciente demanda. La sostenibilidad ha emergido como un pilar fundamental en el sector, llevando a los aeropuertos a abordar el desafío de reducir su impacto ambiental, minimizar emisiones de carbono y adaptar sus infraestructuras a las nuevas necesidades del sector.

En este contexto, los aeropuertos desempeñan un papel crucial en la descarbonización del transporte aéreo, contribuyendo a una industria más sostenible y a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Colaboran estrechamente con aerolíneas y otros actores para promover prácticas sostenibles y son fundamentales en la adopción de biocombustibles de aviación.

Sin embargo, con la llegada de nuevas aeronaves impulsadas por hidrógeno, la infraestructura actual se muestra insuficiente. La adaptación de las infraestructuras aeroportuarias para suministrar hidrógeno gaseoso y líquido representa un desafío importante. A medida que la tecnología aeronáutica evoluciona, los aeropuertos deben actualizarse para satisfacer las demandas de las nuevas generaciones de aeronaves, especialmente aquellas propulsadas por hidrógeno o electricidad, que requieren sistemas de abastecimiento de combustible diferentes a los tradicionales.

En resumen, los aeropuertos son actores esenciales en la descarbonización del transporte aéreo, promoviendo combustibles sostenibles, adoptando tecnologías sostenibles, colaborando con la industria y adaptando sus infraestructuras a las nuevas exigencias tecnológicas.

2.3 El aeropuerto como hub de hidrógeno

Los aeropuertos han evolucionado significativamente a lo largo de los años para adaptarse a las crecientes demandas y necesidades del sector, con el objetivo de proporcionar una experiencia de viaje lo más eficiente y cómoda posible.

Son muchos los retos que este sector ha superado en el pasado. Un ejemplo claro es la superación por parte del sector de las crisis económicas y de las crisis energéticas mundiales, como la crisis económica del año 2008 o la Crisis del petróleo en la década de 1970, la cual provocó un aumento significativo en los precios del combustible y que afectó seriamente al sector de la aviación. Sin embargo, el sector de la aviación pudo superar este reto gracias a la introducción de aviones más eficientes en términos de consumo de combustible por parte de las aerolíneas y la implementación de medidas de ahorro de energía en toda la cadena de valor del sector.

Otro ejemplo claro de superación de retos del sector está relacionado con el terrorismo. Ante los ataques terroristas del 11 de septiembre de 2001 de Nueva York, el sector de la aviación se vio ante la necesidad de llevar a cabo a un endurecimiento significativo de las medidas de seguridad en los aeropuertos y a realizar cambios en los procedimientos de control de pasajeros y equipaje, con el fin de ofrecer a sus clientes un servicio seguro.

La transición del sector de la aviación hacia una aviación sostenible es uno de los grandes retos a los que se enfrenta el sector de la aviación hoy en día. La creciente preocupación de la sociedad por el cambio climático obliga al sector a buscar soluciones y nuevos modelos y conceptos que hagan del sector de la aviación un sector sostenible.

Un aeropuerto como hub de hidrógeno se refiere a un nuevo concepto en el que el aeropuerto se convierte en un centro para la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno como fuente de energía para diversas aplicaciones en la aviación y más allá del sector de la aviación mismo.

La conversión de los aeropuertos en hubs de hidrógeno es necesaria para abordar los desafíos ambientales y económicos del sector de la aviación. Al adoptar el hidrógeno como fuente de energía limpia, los aeropuertos pueden liderar la transición hacia una aviación más sostenible, fomentar la innovación tecnológica y generar beneficios tanto para el medio ambiente como para la propia competitividad del transporte aéreo.

Asimismo, al convertirse en hubs de hidrógeno, los aeropuertos pueden diversificar sus fuentes de energía y reducir su dependencia de los combustibles fósiles. Esto no solo ayuda a reducir las emisiones, sino que también aumenta la resiliencia del aeropuerto, y por tanto del sector, al no depender exclusivamente de los combustibles fósiles.

Así pues, el concepto de aeropuerto como hub de hidrógeno hace referencia a un aeropuerto en el que la infraestructura para la producción, almacenamiento, distribución y uso de hidrógeno está disponible dentro de los terrenos del propio aeropuerto. Tal y como se muestra en la imagen superior, el hidrógeno puede tener diversos usos finales en el entorno aeroportuario:

- **Propulsión de aeronaves:**

Uno de los usos más importantes del hidrógeno en el entorno aeroportuario, y lo que da lugar a la constitución de la presente alianza, es su utilización como combustible en aeronaves. Esto permite vuelos más limpios y sostenibles, contribuyendo a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector de la aviación.

- **Transporte público y privado terrestres:**

El hidrógeno se está empezando a utilizar como combustible en el transporte tanto público como privado como una alternativa a los combustibles fósiles. Muchas ciudades en todo el mundo están sustituyendo su flota de autobuses por autobuses con pila de combustible y algunos fabricantes de automóviles tienen a la venta vehículos de pasajeros impulsados por celdas de combustible que poseen una mayor autonomía a los vehículos eléctricos. Asimismo, algunas empresas con flotas de vehículos están empezando a incorporar vehículos de hidrógeno en sus flotas, las cuales pueden necesitar un suministro de hidrógeno en el aeropuerto.

- **Vehículos aeroportuarios:**

Los aeropuertos cuentan con una variedad de vehículos terrestres, ligeros y pesados, para realizar tareas como transporte de pasajeros, carga y descarga de equipaje, mantenimiento de la infraestructura aeroportuaria, etc. Estos vehículos también pueden beneficiarse del uso de hidrógeno como combustible. La adopción de vehículos de pila de combustible de hidrógeno en lugar de vehículos diésel o gasolina puede ayudar a reducir las emisiones locales y mejorar la calidad del aire en el entorno aeroportuario.

- **Logística y transporte pesado:**

El uso de hidrógeno en el transporte pesado, como camiones y vehículos comerciales, es una alternativa cada vez más prometedora para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la eficiencia en el sector del transporte

- **Energía para instalaciones aeroportuarias:**

El hidrógeno también puede desempeñar un papel importante en el suministro de energía para las instalaciones aeroportuarias. Puede utilizarse en sistemas de trigeneración, para producir electricidad, calor y frío renovable a partir de pilas de combustible de hidrógeno, o como energía de respaldo. Esto permite una gestión energética más eficiente y una reducción de las emisiones de carbono de las instalaciones aeroportuarias.

- **Almacenamiento energético:**

El hidrógeno puede actuar como un medio de almacenamiento de energía en los aeropuertos. Dado que el suministro de energía renovable puede ser intermitente, el exceso de electricidad generada por fuentes renovables puede utilizarse para producir hidrógeno a través de la electrólisis del agua. El hidrógeno almacenado puede ser utilizado posteriormente para generar electricidad cuando la demanda energética sea alta, proporcionando flexibilidad y resiliencia al aeropuerto.

- **Industria local:**

Para provechar la economía de escala, el hidrógeno producido en el entorno aeroportuario podría ser suministrado a la industria cercana como alternativa para descarbonizar sus procesos.

2.4 Problemática respecto al almacenamiento de energía renovable

Uno de los principales retos que existen hoy en día es la descarbonización de la energía. Este proceso debe de hacerse bajo una transición que paulatinamente deje a un lado los combustibles fósiles tradicionales como el carbón, gas natural y el petróleo. Claramente este proceso tiene como fin reducir la alta contaminación atmosférica y el gran impacto ambiental que el uso de este tipo de combustibles genera.

El uso a gran escala de las energías renovables permite proyectar a futuro una independencia energética, de manera que se potencien las principales energías aprovechables como la solar (engloba la energía térmica y la fotovoltaica), eólica, hidráulica, mareomotriz, geotérmica, etc.

Pero no todo es favorable frente a este tipo de energías, pues son intermitentes y su disponibilidad está sujeta a las condiciones climáticas y ambientales. La generación de energía a partir de estos recursos fluctúa según la incidencia solar, la velocidad del viento u otros factores naturales, lo que implica que no estén disponibles de manera constante.

El reto fundamental en la transición hacia fuentes de energía renovable radica en el almacenamiento eficiente de la energía generada, dada la naturaleza intermitente de los recursos. Este desafío cobra más relevancia en la urgente necesidad de reducir la dependencia de combustibles fósiles. En este contexto, encontrar soluciones efectivas para almacenar y distribuir energía de manera sostenible se convierte en un aspecto fundamental para avanzar hacia un sistema energético más limpio y resiliente [4].

Los sistemas actuales que permiten transformar y almacenar energía en la actualidad son:

- **Almacenamiento Térmico:**

El almacenamiento térmico es una estrategia que implica capturar y conservar la energía en forma de calor para su uso posterior. Este método aprovecha materiales con capacidades de retención térmica, como sales fundidas o líquidos caloportadores, para acumular y liberar energía térmica de manera eficiente.

- **Baterías:**

Las baterías son dispositivos que convierten la energía química en eléctrica y viceversa. En el contexto de las energías renovables, las baterías son esenciales para almacenar electricidad generada por fuentes intermitentes como la solar o eólica. Las baterías de ion de litio son comunes en aplicaciones domésticas y comerciales.

- **Aire Comprimido:**

El almacenamiento de aire comprimido implica comprimir aire y almacenarlo en cavernas subterráneas o tanques. Cuando se necesita electricidad, el aire se expande y se utiliza para impulsar turbinas generadoras. Aunque eficiente, la compresión y expansión pueden generar pérdidas de energía.

- **Volantes de Inercia:**

Los volantes de inercia almacenan energía rotacional. Funcionan girando a altas velocidades cuando hay exceso de electricidad y desacelerándose para liberar la

energía cuando se requiere. Estos sistemas son particularmente útiles para proporcionar ráfagas cortas de energía.

- **Supercondensadores:**

Los supercondensadores almacenan energía electrostáticamente. Aunque su capacidad de almacenamiento es menor en comparación con las baterías, pueden cargar y descargar rápidamente. Son ideales para aplicaciones que requieren ráfagas cortas de energía, como frenado regenerativo en vehículos eléctricos.

- **Hidrógeno y Pilas de Combustible:**

El almacenamiento de energía en forma de hidrógeno implica la electrólisis del agua para producir hidrógeno cuando hay exceso de electricidad, y luego utilizar pilas de combustible para convertirlo de nuevo en electricidad cuando sea necesario. Esta tecnología es especialmente interesante debido a su capacidad de almacenamiento a gran escala y su versatilidad en aplicaciones diversas.

El presente trabajo se enfoca en profundizar en este método de almacenamiento, explorando sus desafíos y oportunidades para impulsar la transición hacia un sistema energético más sostenible en el ámbito aeroportuario, aunque extrapolable al resto de la industria.

2.5 El hidrógeno en la aviación

El hidrógeno está destinado a convertirse en el combustible del futuro en la aviación, siendo conscientes de su impacto significativo en el sector aeroportuario. La preparación de infraestructuras y procedimientos adecuados para la fabricación, distribución y almacenaje se vuelve esencial para este protagonista clave en el viaje hacia la descarbonización.

Desde finales del siglo pasado, el sector aeroportuario ha estado inmerso en una carrera hacia la reducción del impacto ambiental, destacando la descarbonización del transporte aéreo como uno de sus objetivos principales. Entre las diversas líneas de trabajo para lograrlo, el uso del hidrógeno como combustible emerge como una de las opciones más atractivas y prometedoras.

A pesar de los desafíos pendientes en relación con el uso del hidrógeno en la aviación, su papel destacado en la descarbonización es innegable. Siendo el elemento más común del universo, el hidrógeno, en su forma molecular H_2O , representa una fuente de energía con un potencial considerable, destacando su contribución a la denominada "hidrogenación" del transporte aéreo.

La teoría subyacente es clara: las aeronaves pueden emplear celdas de combustible de hidrógeno para generar electricidad, alimentando así los motores del avión. Este proceso, basado en una fuente de energía limpia y eficiente, representa una alternativa respetuosa con el medio ambiente en comparación con los combustibles tradicionales para aviones. No obstante, persisten desafíos, entre ellos, la limitada disponibilidad de infraestructuras de combustible de hidrógeno.

El almacenamiento de hidrógeno ya sea a bordo de la aeronave o en instalaciones aeroportuarias, presenta desafíos notables:

- **Baja densidad:**

El hidrógeno, en condiciones normales, ocupa un gran volumen en relación con su masa, complicando su almacenamiento compacto.

- **Alta presión:**

La compresión a altas presiones para un almacenamiento compacto requiere tanques pesados y especializados.

- **Temperatura fría:**

El hidrógeno criogénico implica almacenarse a temperaturas extremadamente bajas para reducir volumen y presión.

- **Alta reactividad:**

La reactividad del hidrógeno requiere un almacenamiento cuidadoso para evitar reacciones no deseadas. Más adelante se mostrará la peligrosidad que el uso del hidrógeno conlleva por su alta inflamabilidad.

- **Costo:**

El almacenamiento seguro y eficiente del hidrógeno actualmente es costoso debido a la infraestructura especializada necesaria.

A pesar de estos desafíos, el hidrógeno criogénico, almacenado a temperaturas de alrededor de $-253^{\circ}C$, emerge como una solución atractiva para abordar algunos de estos inconvenientes, especialmente en términos de espacio y seguridad.

La producción de hidrógeno presenta distintos métodos, desde el menos sostenible "hidrógeno gris" hasta el más respetuoso con el medio ambiente "hidrógeno verde", obtenido mediante la electrólisis con electricidad renovable. Aunque enfrenta desafíos significativos, la producción de hidrógeno verde podría representar un cambio fundamental hacia la sostenibilidad.

El uso del hidrógeno como fuente de combustible en la aviación se espera que evolucione mediante:

- **Mayor adopción:**

A medida que se desarrolla más infraestructura de combustible de hidrógeno, se anticipa una adopción generalizada en la aviación, reduciendo emisiones y mejorando la calidad del aire.

- **Tecnología mejorada:**

Avances en celdas de combustible y almacenamiento hacen que el hidrógeno sea más eficiente y asequible.

- **Nuevos diseños de aeronaves:**

La optimización para sistemas de celdas de combustible puede conducir a diseños más eficientes y livianos.

- **Costos reducidos:**

Mejoras tecnológicas e infraestructura podrían disminuir los costos, haciendo el hidrógeno más accesible en comparación con combustibles tradicionales.

En paralelo, la Movilidad Aérea Avanzada (AAM) también contribuirá al desarrollo del uso del hidrógeno en el transporte aéreo, especialmente en conceptos más allá de la aviación tradicional, como las aeronaves eléctricas de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL).

Aunque el hidrógeno presenta un potencial significativo en la aviación, no es la única alternativa. Compañías como Airbus están explorando soluciones innovadoras, como aviones sin emisiones directas que utilizan hidrógeno como combustible, desafiando las convenciones actuales.

Finalmente, la implementación del hidrógeno en los aeropuertos, gestionando su fabricación, almacenamiento y distribución, será un desafío clave en los próximos años. Se espera que algunos aeropuertos cuenten con instalaciones de fabricación de hidrógeno, promoviendo la tendencia hacia el hidrógeno verde mediante energías renovables. No obstante, otros aeropuertos dependerán de la adquisición externa de hidrógeno, lo que requerirá procedimientos y almacenamiento específicos.

2.5.1 El hidrógeno

La idea que se pretende desarrollar es el uso de energía totalmente limpia (H₂ verde) para el suministro a las aeronaves y como medio de propulsión para los equipos handling del aeropuerto.

Previamente al desarrollo como tal de esta idea, resulta necesario mencionar algunas características relativas al elemento químico en cuestión: el Hidrógeno (H₂).

Como bien es conocido, el hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica con un número atómico de 1. Además, es el **más ligero** de dicha tabla periódica formado sencillamente por un electrón y un protón. Su forma estable es formando moléculas diatómicas.

El hidrógeno es un elemento químico que destaca por tener una alta densidad gravimétrica, es decir, un kg de hidrógeno libera más energía que cualquier otro combustible. Sin embargo, rara vez el hidrógeno se encuentra de forma aislada en la naturaleza, por lo que no lo podemos extraer directamente, sino que tiene que ser producido.

Por otro lado, resulta especialmente importante añadir al planteamiento que es un gas inflamable, incoloro, no metálico e insoluble en agua (es uno de sus dos elementos). Cabe añadir una cosa fundamental para el estudio que se pretende realizar, y es que un solo Kilogramo de Hidrógeno como compuesto para uso como combustible tiene hasta tres veces más energía (poder calorífico) que la gasolina, el gasóleo o el gas, lo que le convierte automáticamente en un candidato muy relevante para su uso en las industrias como la automovilística o la aeronáutica, entre otras.

El hidrógeno renovable se posiciona como uno de los principales vectores energéticos en el largo plazo, pues su producción y consumo es neutral climáticamente y no genera emisiones contaminantes. A diferencia de otros vectores energéticos renovables, tiene la capacidad de ser almacenado, como gas a presión o en estado líquido, lo que le otorga un mayor grado de gestionabilidad.

Este elemento, tiene por objeto ser el eje tractor que guíe y fomente el despliegue y desarrollo renovable global, debido al significativo papel que está llamado a desempeñar en la transición energética hacia la descarbonización de la economía en 2050, dado que, permite integrar la electricidad renovable excedentaria. Además, permite desplazar el uso de materias primas industriales o fuentes de energía de origen fósil por materia prima renovable, abriendo una nueva ruta para la electrificación del transporte y la movilidad sostenible.

El hidrógeno no es una fuente de energía primaria sino un vector energético, pues se trata de un producto que requiere una aportación de energía para ser obtenido y que cuenta con la particularidad de ser capaz de almacenar energía para, posteriormente, ser liberada de forma gradual cuando se requiera.

- **Estructura molecular:**

El hidrógeno es el elemento más simple y ocupa la primera posición de la tabla periódica.

El núcleo del átomo de hidrógeno contiene un protón, mientras que un electrón orbita equilibrando su carga. Presenta estados de oxidación de 1, -1 y 0 debido a la coexistencia de distintos isótopos.

Químicamente, el hidrógeno es altamente reactivo debido a su configuración con un solo electrón en órbita. Esto lleva a que los átomos de hidrógeno se combinen formando la molécula H_2 , la más pequeña y ligera de la naturaleza, con la capacidad de difundirse a través de materiales considerados herméticos.

Aunque no es tóxico ni contaminante, su manipulación requiere precauciones debido a su alta reactividad. Dada su incolora naturaleza, las llamas de hidrógeno-oxígeno puro son casi invisibles y arden en la gama de colores ultravioleta. Para detectar posibles fugas, se emplea un detector de llama, ya que las llamas de hidrógeno tienden a ascender rápidamente en el aire.

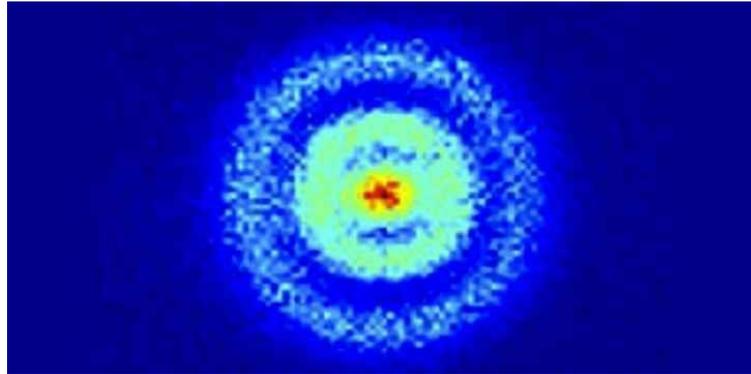


Figura 3. Espacio orbital de un átomo de hidrógeno a través de un microscopio cuántico [5].

- **Reactividad del hidrógeno:**

La reactividad es una propiedad que caracteriza a ciertos elementos o compuestos químicos que se encuentran en un **estado inestable** y buscan reaccionar con otros elementos para alcanzar la estabilidad.

En este proceso, los reactivos, inicialmente inestables, se transforman en productos, elementos finales y estables, liberando parte de su energía en el proceso de estabilización. Se consideran reactivos aquellos productos que, al entrar en contacto con elementos incompatibles, pueden desencadenar reacciones de alto potencial energético, potencialmente llevando a inflamación o explosión.

Estas reacciones químicas suelen requerir una cierta cantidad de energía de activación. Por ejemplo, al proporcionar una pequeña cantidad de energía de activación a una mezcla de hidrógeno y oxígeno, como a través de una chispa, las moléculas reaccionan vigorosamente, generando calor y produciendo agua como resultado final.

Es importante destacar que la formación de agua mediante la **reacción** de hidrógeno y oxígeno es **reversible**, lo que significa que, aplicando una cantidad adecuada de energía, es posible descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno.

- **Contenido energético del hidrógeno:**

Cuando un combustible se somete a un proceso de combustión exotérmica con oxígeno, los productos de la combustión incluyen elementos específicos (dependientes del combustible), agua y calor.

La energía liberada en este proceso se mide a través del poder calorífico superior (PCS), que considera la energía de condensación del agua, y el poder calorífico inferior (PCI), que no la aprovecha [6]. Estos conceptos cuantifican la cantidad de energía en una masa determinada y se expresan en J/Kg en el sistema internacional (SI).

En la tabla se muestra el contenido energético de varios combustibles, destacando que el hidrógeno, en estado gaseoso, tiene el mayor contenido energético por unidad de masa, casi triplicando el de la gasolina.

Tipo de Combustible	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
Hidrógeno	141,8	119,9
Diesel	44,8	43,5
Gasolina	47,5	44,5
Metano	55,5	50
Propano	44,8	45,6

Tabla 2. Poder energético del hidrógeno frente a otros combustibles [6].

La **energía** liberada por el hidrógeno en una reacción de combustión es aproximadamente **2,5 veces** mayor que la de los **hidrocarburos**. Esta característica es crucial en aplicaciones donde el peso del combustible es fundamental, como en programas espaciales, ya que se necesita aproximadamente un tercio de la masa de hidrógeno en comparación con un hidrocarburo para una carga dada.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que, a igualdad de masa, una explosión de hidrógeno puede ser más violenta que la de hidrocarburos comunes. A pesar de ello, la duración de la deflagración suele ser inversamente proporcional al contenido energético del combustible, lo que implica que un fuego de hidrógeno tiende a extinguirse más rápidamente que uno de hidrocarburos.

La densidad energética, que expresa la cantidad de energía por un determinado volumen de combustible, es más baja en el hidrógeno que en los hidrocarburos debido a la estructura molecular menos compleja del primero. Esto conlleva a la necesidad de un volumen de almacenamiento significativamente mayor para una cantidad equivalente de energía en hidrógeno en comparación con un hidrocarburo.

- **Propiedades de las llamas de hidrógeno:**

La llama es una región de gases incandescentes cuya temperatura es variable y depende de factores como el tipo de combustible y la concentración de comburente. Según la norma ISO 13943, se define la llama como la zona de combustión en fase gaseosa, típicamente con emisión de luz. Este fenómeno, propio de la combustión, se manifiesta como un evento luminoso acompañado de la producción de calor. La luminosidad o intensidad de la llama varía según la naturaleza del combustible y la contribución del comburente.

En particular, las llamas de hidrógeno presentan un color azul claro y son prácticamente invisibles a la luz del día. En varios aspectos, el fuego de hidrógeno puede considerarse más seguro que el fuego de gasolina, ya que el hidrógeno

gaseoso, debido a su alta flotabilidad y difusividad, se eleva rápidamente en el aire. Como resultado, estas llamas suelen ser muy localizadas y verticales.

Aquí se muestra un ejemplo donde se compara la llamarada provocada por el hidrógeno comparada con la de gasolina. Como se puede apreciar, en la izquierda el hidrógeno es mucho más energético y no afecta al interior del coche. Por otro lado, el fuego de la gasolina se expande a la vez que se vierte y provoca muchos más daños en el vehículo.



Figura 4. Comparación llamarada de hidrógeno vs gasolina [7].

- **Diagrama de fases del hidrógeno:**

En condiciones estándar, el estado de agregación según el diagrama de fases del hidrógeno es gaseoso.

El punto triple del hidrógeno se define: 13,96 K a 0,0721 bar y 13,95 K a la misma presión. En cuanto a los parámetros críticos del hidrógeno se definen a continuación:

Temperatura crítica (T_c)	33,14 K
Presión crítica (P_c)	12,96 bar
Densidad crítica (δ_c)	0,03126 g/cm ³
Volumen crítico (V_c)	64,48 cm ³ /mol
Punto normal de Ebullición (PNE)	20,37 K

Tabla 3. Parámetros críticos del hidrógeno [6].

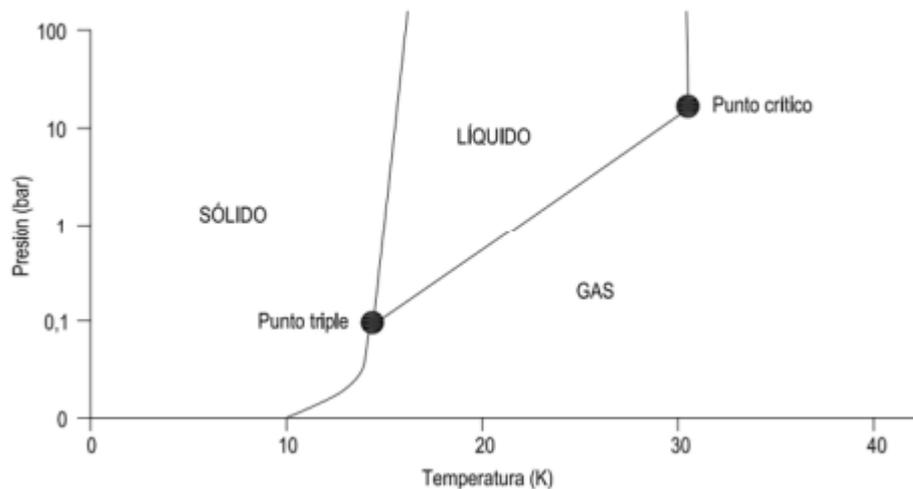


Figura 5. Diagrama P-T del hidrógeno [8].

2.5.2 Concepto de vector energético

Cabe destacar que el hidrógeno no es una fuente de energía primaria, sino un medio de acumulación y transporte de energía. Es por ello, por lo que se necesita una cierta cantidad de energía y materia prima para producirlo.

Entre las metas principales relacionadas con el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos, se enuncian los siguientes objetivos:

- Garantizar **acceso universal** a servicios energéticos modernos y asequibles.
- **Aumentar** significativamente el uso de **energías renovables**.
- Duplicar la mejora en **eficiencia energética** a nivel mundial.
- Fortalecer la cooperación internacional para acceso a **tecnologías limpias** y promover inversiones en **infraestructura sostenible**.
- **Ampliar infraestructura** y **mejorar tecnologías** para servicios energéticos en países en desarrollo, especialmente en los menos adelantados y pequeños Estados insulares.

Lo anterior ha impulsado el desarrollo de proyectos para satisfacer la demanda de energía eléctrica a nivel mundial, por lo que se ha producido una gran expansión en el uso de fuentes de energía renovables en la producción de electricidad.

Es importante destacar que actualmente existe una problemática en el suministro de estas energías, pues las que más abundan (eólica y solar), no están disponibles de forma ilimitada. Por ello, se necesita de un medio para almacenar esa energía excedente en los momentos valle o la energía generada de forma directa.

Es en este punto donde el hidrógeno lleva a cabo un papel fundamental, pues es el único portador de energía con cero emisiones de carbono, a parte de la electricidad, el

cual se está evaluando su aplicación en el transporte con emisiones de carbono reducidas, la descarbonización industrial y el suministro de calor.

Asimismo, el hidrógeno verde o renovable se obtiene mediante el proceso de electrólisis del agua, que se detalla más adelante, y el agua se presenta como una fuente inagotable para la producción de hidrógeno como recurso energético, lo cual representa una clara ventaja en comparación con los combustibles actuales.

El hidrógeno puede ser fácilmente almacenado en forma gaseosa o líquida a diferentes temperaturas y presiones, lo que lo posiciona como una fuente más versátil y adaptable para su uso. También es fácil de transportar, ya que se puede mezclar hasta en un 20% con gas natural y enviado por los mismos sistemas y redes de transporte (Iberdrola 2020).

Si nos preguntamos el método más común en la **actualidad** de producción de hidrógeno, descubrimos que en torno al 95% de su producción es a partir de productos petroquímicos. Este proceso es conocido como “reformado térmico”, el cual se caracteriza por calentar a altas temperaturas (800 y 1500°C) combustibles como el gas natural o el metano en presencia de un catalizador (platino u otros metales preciosos) para producir hidrógeno y otros gases como el CO₂ y vapor de agua.

El reformado térmico es un proceso eficiente y muy utilizado como se ha comentado con anterioridad, pero tiene la particularidad de que genera emisiones significativas de gases de efecto invernadero como el CO₂, algo que se tiene como objetivo reducir notablemente. Por ello este proceso se ve cada vez más limitado en términos de sostenibilidad.

2.5.3 Tipos de hidrógeno

A continuación, se citan los distintos tipos de hidrógeno, clasificados según la materia prima requerida y las emisiones equivalentes de CO₂ generadas durante su producción.

- **Hidrógeno renovable o verde:**

Este tipo de hidrógeno se obtiene mediante el proceso de **electrólisis**, utilizando agua desionizada como materia prima y energía renovable como fuente.

- **Hidrógeno gris:**

En este caso hablamos de la mayor parte del hidrógeno que se consume **hoy en día** en España. Su producción es **a partir de gas natural**, metano o gases derivados del petróleo.

- **Hidrógeno azul:**

Obtenido de forma similar al hidrógeno gris, que se define a continuación, pero al que se le aplican **técnicas de captura**, uso y almacenamiento de carbono, lo que reduce las emisiones de CO₂ hasta en un 95%.

- **Hidrógeno negro:**

Es un proceso aún más contaminante, ya que la materia prima utilizada para su producción es el **carbón**, la energía nuclear o la electricidad. Normalmente no se suele incluir en esta clasificación debido a la dificultad de cuantificar el impacto en el medio ambiente.

Existe otra variante, el **hidrógeno rosa**, que se obtiene mediante la electrólisis del agua cuando la electricidad proviene de la energía nuclear.

HIDRÓGENO	MATERIA PRIMA	PROCESO
No Renovable		
NEGRO	Carbón	Gasificación
GRIS	Gas Natural	Reformación
AZUL	Gas Natural	Reformación
ROSA	Agua	Electrólisis
Renovable		
VERDE	Agua	Electrólisis

Tabla 4. Tipos de hidrógeno (Elaboración propia).

Los costes de producción de uno u otro tipo de hidrógeno dependen de los costes del gas natural, de la disponibilidad de electricidad renovable en coste y cantidad adecuadas y de la evolución de los costes de fabricación y operación de los electrolizadores. Esto hace que las estimaciones sean en cierta forma variables.

El estudio del presente trabajo de fin de máster se basa en la producción, distribución y operación de hidrógeno verde, al ser la opción de las diferentes variables comentadas anteriormente que no contamina ni en su obtención ni en su uso.

Por otro lado, como fuente de energía para garantizar la producción, se escogerá la generación fotovoltaica debido a la gran abundancia de este recurso en nuestro país, especialmente en el sur de España.

Evidentemente la ruta a seguir se centra en el desarrollo de hidrógeno renovable, con miras a posicionarlo como referente tecnológico en producción que contribuya con los siguientes objetivos principales:

- **Reducir** las **emisiones** locales y gases de efecto invernadero generados en los ciclos de producción.
- **Aprovechar** la energía **renovable** excedentaria generada en las horas de menor consumo eléctrico.
- **Ampliar** la **descarbonización** y la energía **renovable** en el sector aeroespacial, y permitir de guía para que se traslade a otros sectores en un futuro cercano.

2.5.4 Formas de obtención del hidrógeno

2.5.4.1 Reformado del gas natural

La obtención del hidrógeno a partir del reformado de gas natural es un proceso elemental hoy en día en la producción a gran escala de este elemento versátil. Este método, también conocido como reformado de vapor, es un proceso que transforma el gas natural (metano) en hidrógeno y dióxido de carbono mediante reacciones controladas. A continuación, se describen las etapas clave y las reacciones involucradas en el proceso [3]:

1. Desulfurización.

Antes del propio reformado, el metano se somete a un proceso para eliminar los compuestos de azufre que podrían dañar los catalizadores en etapas posteriores.

2. Etapas de reformado.

- **Reformado primario.**



- **Reformado secundario.**



Ambas etapas son **endotérmicas**, es decir, absorber calor para impulsar las reacciones.

3. Ajuste de la Relación H₂/CO.

Etapas de ajuste en la que se logra la relación deseada de hidrógeno a monóxido de carbono, pues se requiere una relación específica.

4. Reformado de vapor a alta temperatura.

Para llevar a cabo este proceso, se requiere de unas condiciones específicas:

- **Temperatura.**

El reformado primario se lleva a elevadas temperaturas (entre 700 y 1000 °C). El secundario opera a temperaturas ligeramente más bajas.

- **Presión.**

Es variante en el proceso, pero oscila entre los 20 y 30 bares para favorecer a las reacciones.

- **Catalizadores.**

Se utilizan catalizadores de níquel u otros metales para acelerar las reacciones y aumentar la eficiencia del proceso.

- **Relación vapor de agua/metano.**

Es un aspecto fundamental para maximizar la producción de hidrógeno.

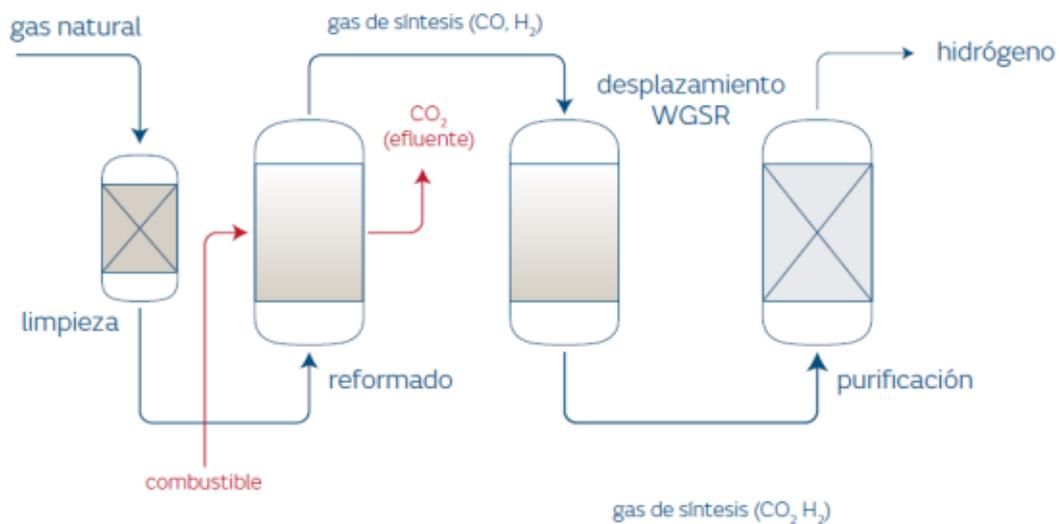


Figura 6. Proceso de reformado del gas natural [3].

2.5.4.2 Reformado del gas natural con captura de CO₂

Este reformado del gas natural es una variante del expuesto anteriormente en la que se trata de mitigar las emisiones de dióxido de carbono asociadas a la producción de hidrógeno. Este método incorpora una etapa adicional para separar y capturar el CO₂ producido durante el proceso.

Esta etapa de captura de CO₂ se lleva a cabo después del reformador primario y antes del reformado secundario (expuestos anteriormente). Se emplean tecnologías de captura como solventes químicos o adsorbentes sólidos, para separar selectivamente el CO₂ del flujo de gases.

Como es evidente trata de reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático. Este enfoque se alinea con los esfuerzos para producir hidrógeno de manera más sostenible y con menor impacto ambiental.

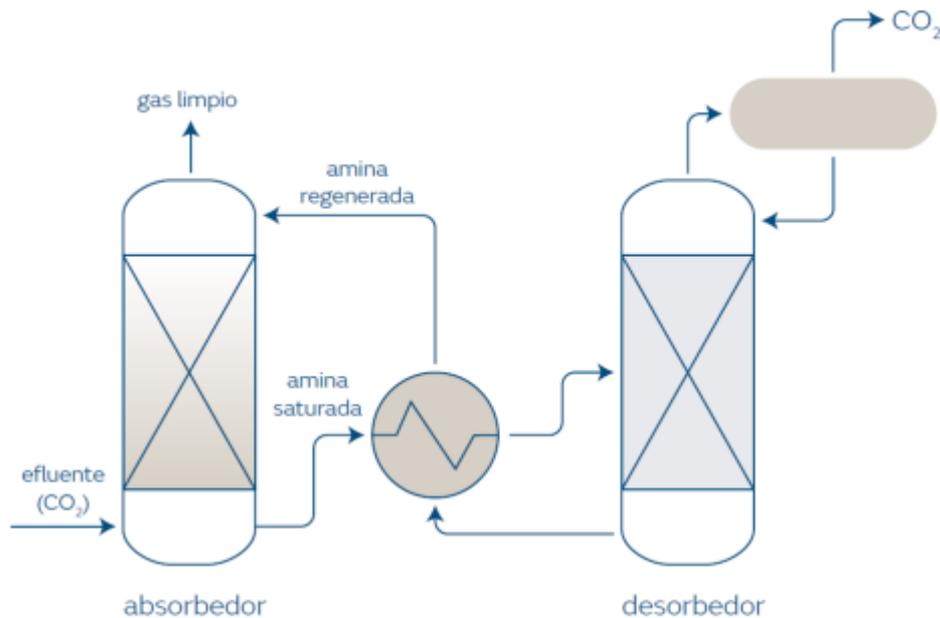


Figura 7. Proceso de reformado del gas natural con captura de CO₂ [3].

2.5.4.3 *Electrólisis*

Como se ha comentado con anterioridad, el proceso que se debe potenciar es el que hace **uso** de **electricidad renovable**, y concretamente del proceso de electrólisis.

Este proceso consiste en la disociación de la molécula de agua a en oxígeno e hidrógeno en estado gaseoso por medio de una corriente eléctrica continua, suministrada por una fuente de alimentación conectada a dos electrodos, en cuya superficie se produce la ruptura de la molécula del agua. Para la aplicación de esta tecnología, existen varios tipos de electrolizadores, entre los que destacan los siguientes [3]:

- **Electrolizadores alcalinos:**

El electrolito donde se produce la conducción de los iones es una disolución alcalina, generalmente de hidróxido de potasio (KOH). Son los más comunes en la actualidad, al ser los de mayor rentabilidad económica y madurez tecnológica. Es una tecnología con una baja densidad de corriente, lo que implica menor cantidad de hidrógeno por volumen de equipo; o que la producción de hidrógeno está limitada a un rango de operación del 20-100% del funcionamiento nominal, debido a que los gases generados en ánodo y cátodo pueden sufrir difusión a través del diafragma.

- **Electrolizadores de Proton Exchange Membrane (PEM):**

En este caso, el electrolito es un polímero sólido conductor de protones, reduciendo los problemas de corrosión del anterior a nivel de sistema, aunque deben hacerse frente a otros problemas de corrosión, que afectan a los componentes individuales del electrolizador. Además, se requiere el uso de metales preciosos, lo que implica costes superiores, aunque pueden trabajar a mayores densidades de corriente y permiten acoplarse fácilmente a sistemas fluctuantes, como las energías renovables.

- **Electrolizadores de Anion Exchange Membrane (AEM):**

Este tipo de electrolizadores es una variante de los electrolizadores alcalinos, pero utilizando como electrolito una membrana de intercambio aniónico (equivalencia con PEM) de tipo aniónico. Este tipo de tecnología es más económica que los electrolizadores PEM, ya que sobre la membrana no se requiere de metales preciosos como catalizadores de metales no nobles, siendo la electrólisis AEM de bajo coste y altamente estable para la producción de hidrógeno. No obstante, esta tecnología se encuentra en fase de investigación.

- **Electrolizadores de óxido sólido (SOEC):**

Es la tecnología menos desarrollada. El electrolito está elaborado con materiales cerámicos, lo que permite la reducción en sus costes de fabricación, y cuentan con un alto grado de eficiencia energética, aunque debe aportarse para ello temperaturas superiores a los 700°C. A diferencia de los anteriores, permiten convertir el hidrógeno generado en electricidad nuevamente si se emplean dispositivos reversibles, aportando servicios de equilibrio a la red.

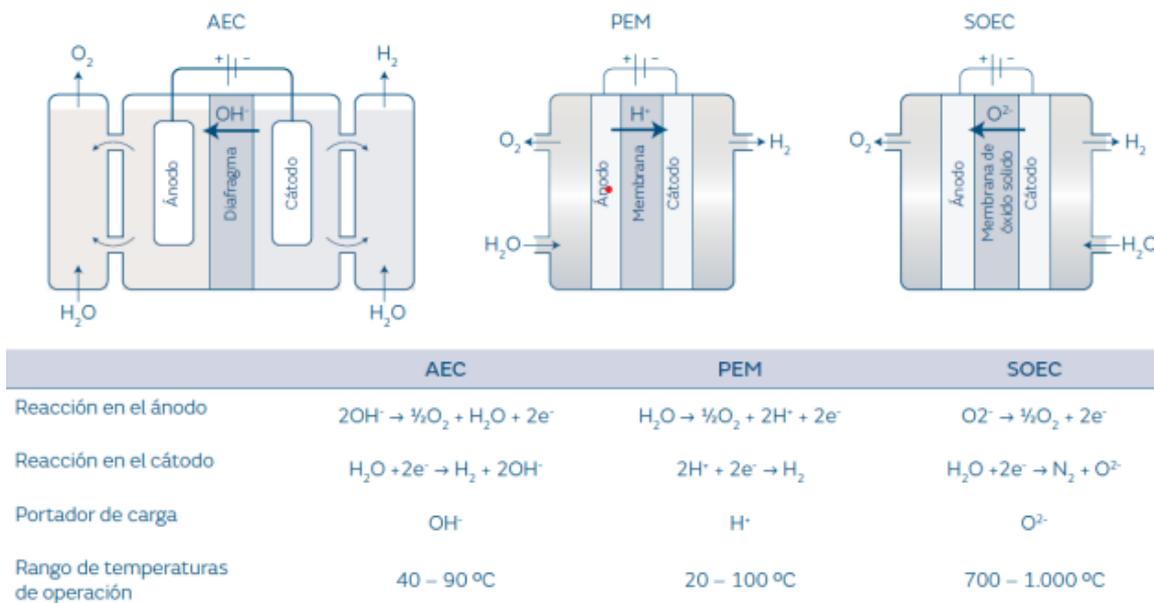


Figura 8. Tipos de electrolizadores y procesos [3].

El proceso de electrolizado más habitual es el método **PEM**:

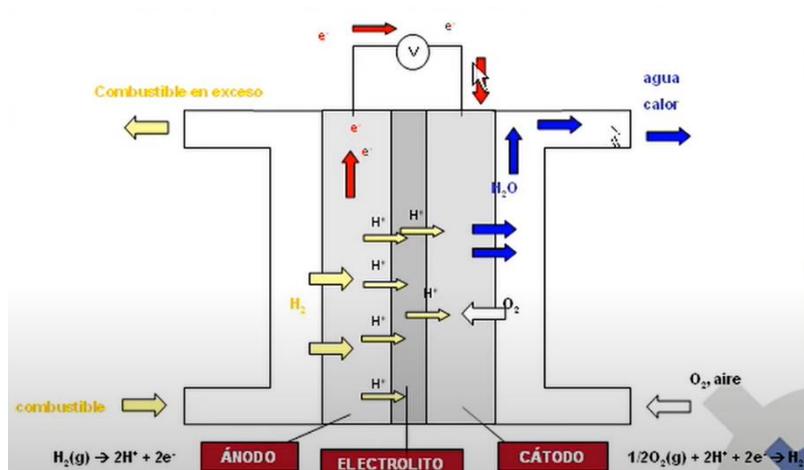


Figura 9. Detalle de funcionamiento de electrolizador PEM [3].

La entrada de combustible (hidrógeno) ocurre en el ánodo, donde pierde electrones que fluyen a través de un sistema de recepción hacia el cátodo. En el cátodo, el oxígeno del aire acepta estos electrones, reduciéndose y produciendo agua junto con calor como resultado de la reacción. La electricidad se genera gracias a este flujo de electrones, y es crucial resaltar que también existe un flujo de hidrógeno cargado positivamente a través del electrolito.

Podemos identificar tres tipos de fenómenos fundamentales en este proceso:

- **Transporte de materia:**

Se refiere al flujo de materia a través de la propia pila de combustible.

- **Transporte de carga:**

Involucra especies cargadas que atraviesan el electrolito, contribuyendo al proceso electroquímico.

- **Transporte de energía:**

Dado que la reacción es exotérmica, se genera calor durante el proceso, contribuyendo al transporte de energía.

Pasando a los elementos básicos de la pila de combustible, se encuentran:

- **Electrodo:**

Sitios físicos donde ocurren las reacciones electroquímicas anódicas y catódicas. Es esencial que estos sitios tengan una superficie específica elevada para permitir la introducción eficiente de compuestos. Además, deben ser capaces de transportar las distintas especies de una fase a otra.

- **Ánodo:**

Este es el sitio donde tiene lugar la reacción de oxidación del combustible. Se pone en contacto el combustible sin oxidar, el combustible oxidado y el propio ánodo. Su estructura suele ser porosa para maximizar la superficie de intercambio. A menudo, se forma con materiales catalíticos como platino o níquel, lo que puede aumentar el costo de la pila.

- **Cátodo:**

Aquí se produce la reducción del comburente. Se pone en contacto el comburente sin reducir y reducido, junto con la especie oxidada y el ánodo en sí. Al igual que el ánodo, suele ser poroso para asegurar un buen contacto entre las fases.

2.5.5 Formas de transporte del hidrógeno

El transporte de hidrógeno presenta **desafíos logísticos** significativos que requieren soluciones adaptadas a distintas distancias y volúmenes.

Para **distancias cortas** y volúmenes pequeños, el transporte mediante **tuberías** es eficiente y económico, permitiendo la distribución local del hidrógeno gaseoso. Los **camiones** criogénicos también son utilizados para distancias moderadas y mayores volúmenes, transportando hidrógeno en estado líquido a temperaturas extremadamente bajas.

Cuando se trata de **distancias** más **extensas**, especialmente a nivel internacional, el transporte **marítimo** de hidrógeno líquido emerge como una opción viable. Este método aprovecha barcos cisterna especiales diseñados para mantener el hidrógeno en su forma líquida, reduciendo el volumen y facilitando el transporte a larga distancia.

El hidrógeno, siendo un recurso que se producirá en regiones con abundancia de recursos, deberá ser transportado hacia áreas con alta densidad poblacional o intensa actividad industrial. Este traslado entre países productores y consumidores representa uno de los desafíos fundamentales.

Afortunadamente, existen diversas alternativas para abordar esta cuestión, y una de las más prometedoras es el transporte marítimo mediante **amoníaco**. Esta opción destaca por su **eficiencia** y **seguridad**, ya que el amoníaco puede llevar más hidrógeno por unidad de volumen que el hidrógeno líquido y puede mantenerse en estado líquido con cambios mínimos de temperatura o presión.

La producción generalizada de amoníaco y su infraestructura ya existente facilitan su integración en los sistemas energéticos, una vez en el lugar de destino, el amoníaco se puede descomponer para liberar el hidrógeno nuevamente, aunque se plantean desafíos asociados con la conversión y reconversión de este compuesto, lo que afecta los costos y la eficiencia de la cadena de suministro.

	Compresión	Licuido	LOHC	Amoniaco
	✓	✓	✗	✗
	✓	✗	✗	✗
	✓	✓	✓	✓

Figura 10. Formas de transporte del hidrógeno [9].

El desarrollo del hidrógeno sin emisiones depende en gran medida del transporte desde los centros de producción hasta los de consumo. Actualmente, existen tres

opciones principales: camiones, tuberías y barcos (como se puede apreciar en la figura 10).

Dado que el hidrógeno en estado gaseoso ocupa un gran volumen, debe ser comprimido o licuado. En el caso del transporte marítimo, es esencial para la logística del hidrógeno, y se pueden considerar varias alternativas, como la absorción en líquidos orgánicos portadores de hidrógeno (LOHC) o la conversión en amoníaco, como se mencionó anteriormente. Una vez en su destino, se puede optar por reconvertirlo a hidrógeno o utilizar directamente el amoníaco.

La elección del **medio** de transporte **ideal depende** del **volumen** que se desea transportar y la **distancia** que se pretende cubrir. Para volúmenes bajos, los camiones son suficientes y evitan inversiones costosas. Para volúmenes medios y altos, las tuberías y el transporte marítimo son las mejores opciones.

Las tuberías ofrecen la ventaja de costos relativamente estables al aumentar el volumen transportado, mientras que los barcos son ideales para distancias considerables sin un aumento significativo de costos.

Según la Perspectiva de costos de Frontier Economics [9], para crear una red eficiente de hidrógeno se han de seguir los siguientes criterios desde el punto de vista de la Unión Europea:

- **Importación** de H₂ a la Unión Europea, norte de **África**, **Sudamérica** y **Oriente** Medio.
- Transporte por **tubería desde** el norte de **África** identificado como una opción económica.
- Transporte **marítimo** como la única opción viable para **cruzar el Atlántico**.
- Eficiencia **variable** para **Oriente** Medio, dependiendo del volumen y la conversión del amoníaco.

En resumen:

- Para **volúmenes bajos**, los **camiones** son adecuados, evitando inversiones costosas.
- Para **volúmenes medios y altos**, las **tuberías** ofrecen costos relativamente estables, mientras que el transporte **marítimo** es ideal para distancias considerables.
- Desde el punto de vista de los **costos**, se ha considerado la importación de H₂ a diversas regiones, destacando la eficiencia del transporte por tubería desde el norte de África, la necesidad de transporte marítimo para cruzar el Atlántico y la eficiencia variable para Oriente Medio según el volumen y la conversión del amoníaco.

A continuación, se puede observar una gráfica en la que se muestra esa flexibilidad a la hora de elegir el sistema de transporte adecuado:

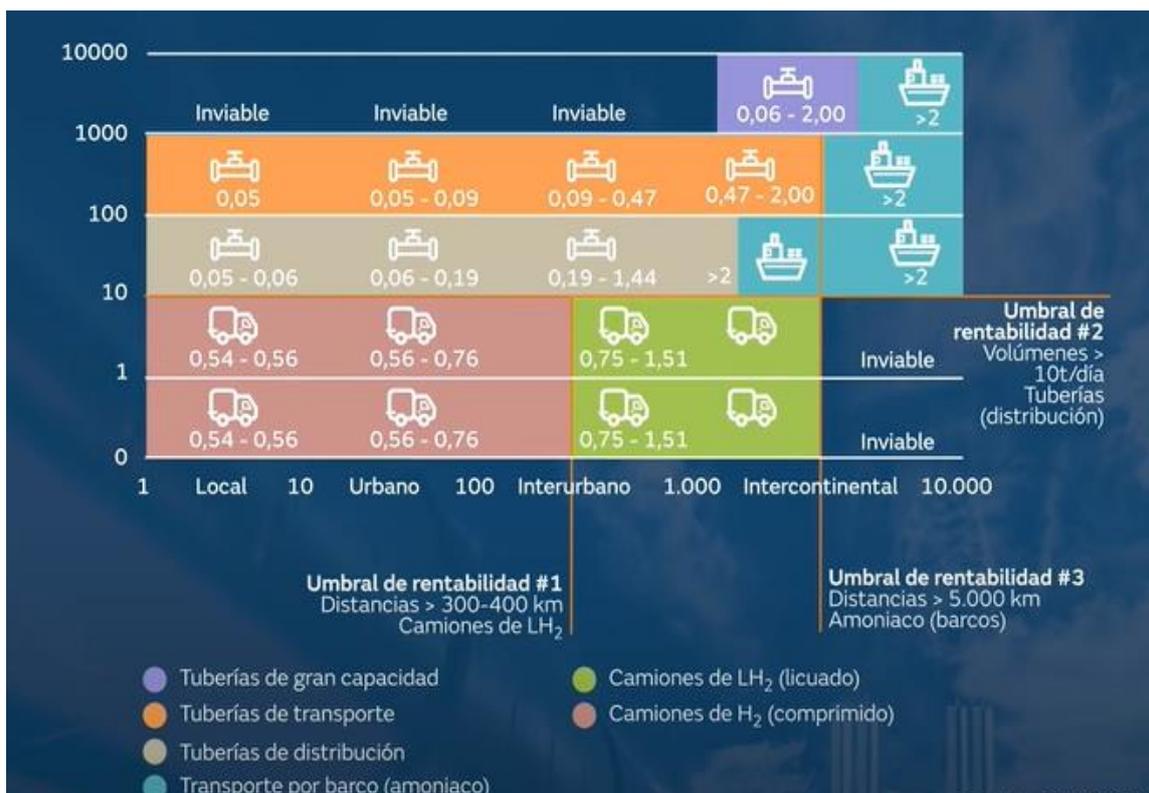


Figura 11. Umbrales de rentabilidad en el transporte de hidrógeno [9].

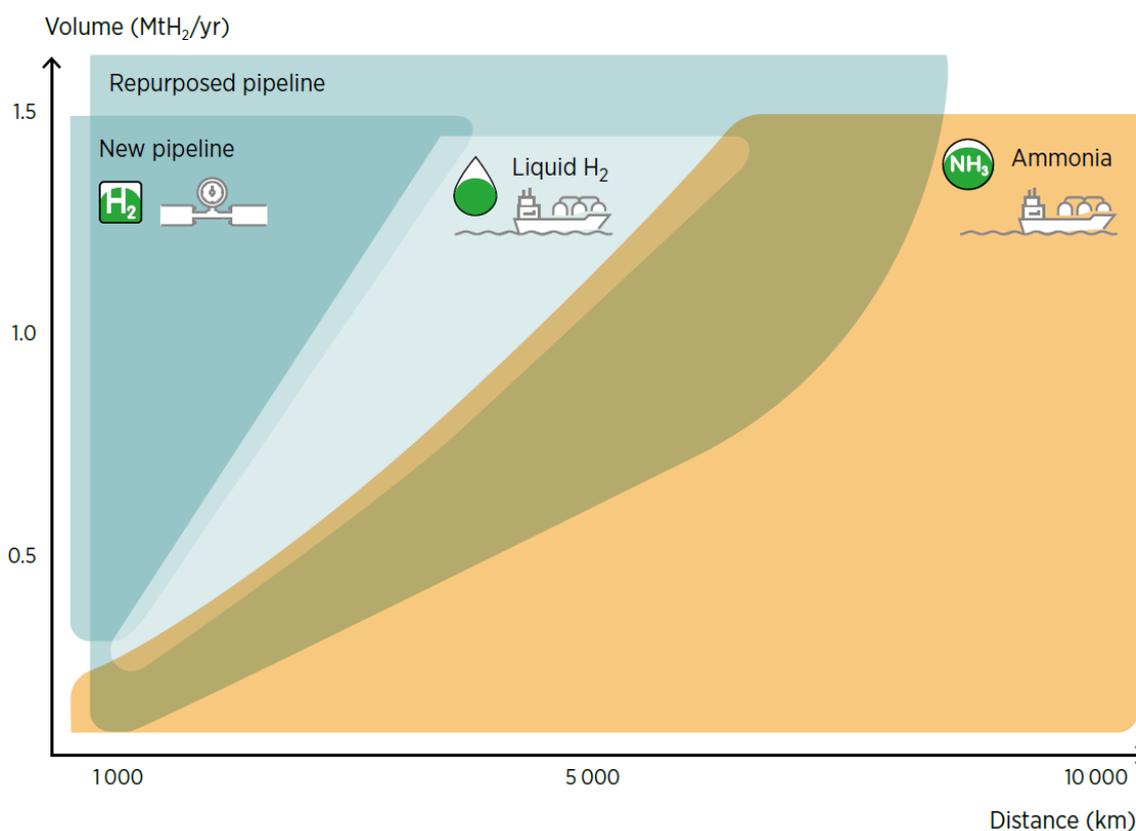


Figura 12. Transporte de H₂ en función de distancia recorrida y volumen transportado [9].

A continuación, presentaré estas figuras que analizan las tres posibilidades de transporte de hidrógeno desde Oriente Medio, Marruecos y Sudamérica:

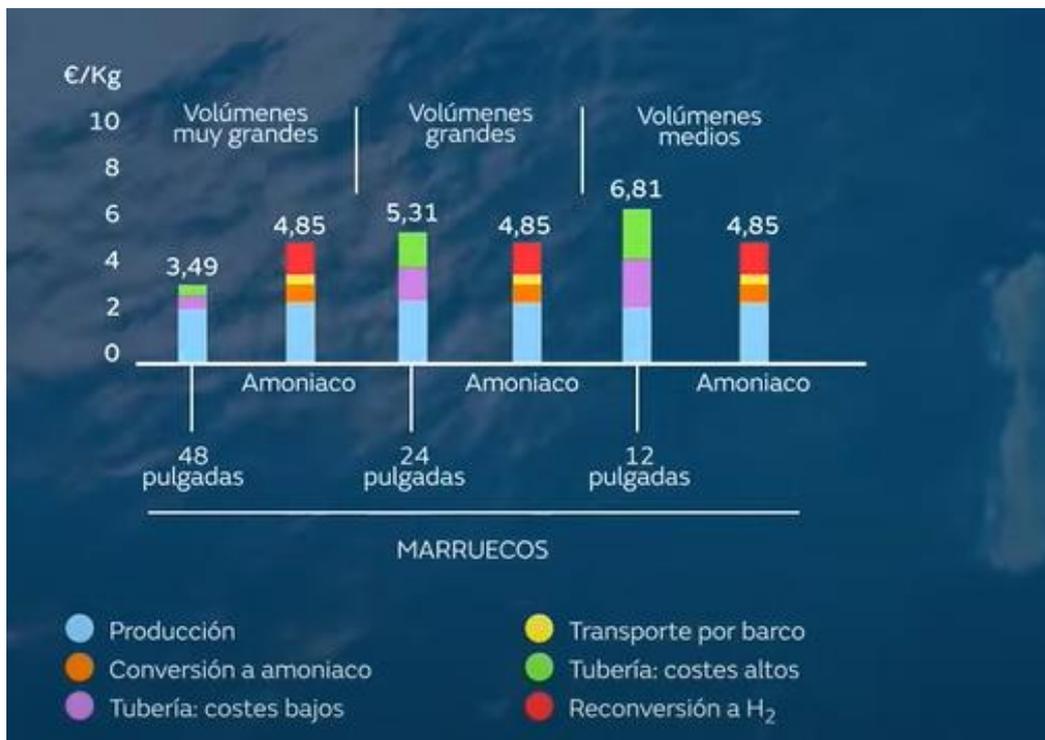


Figura 13. Transporte desde Marruecos [9].

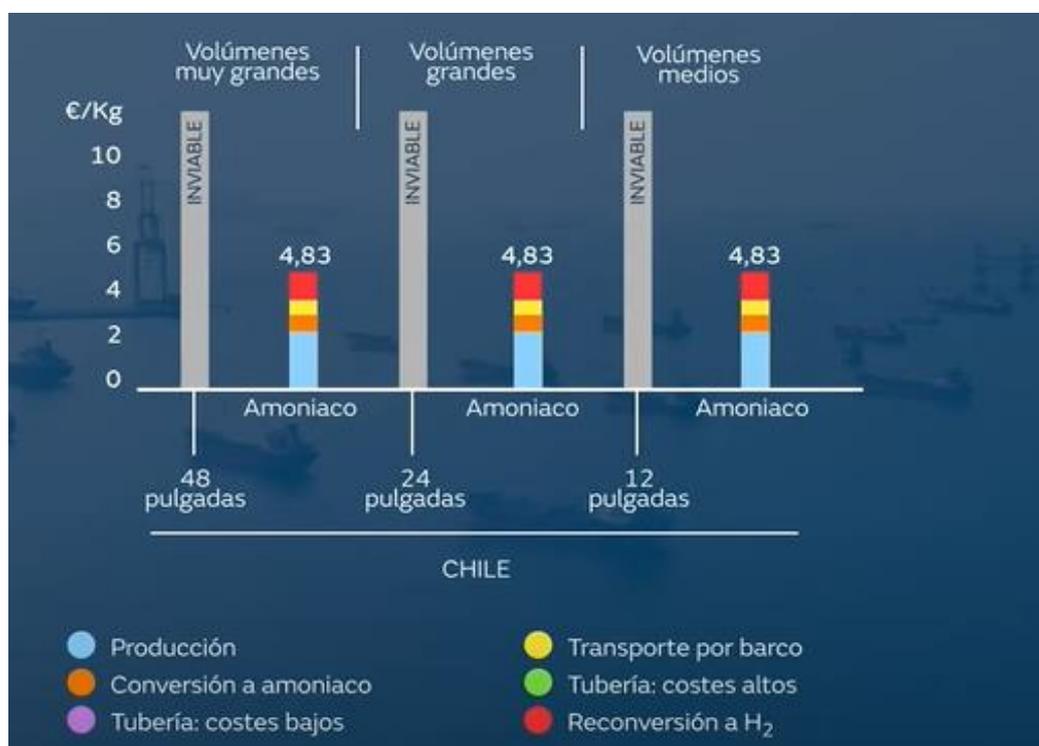


Figura 14. Transporte desde Sudamérica (Chile) [9].

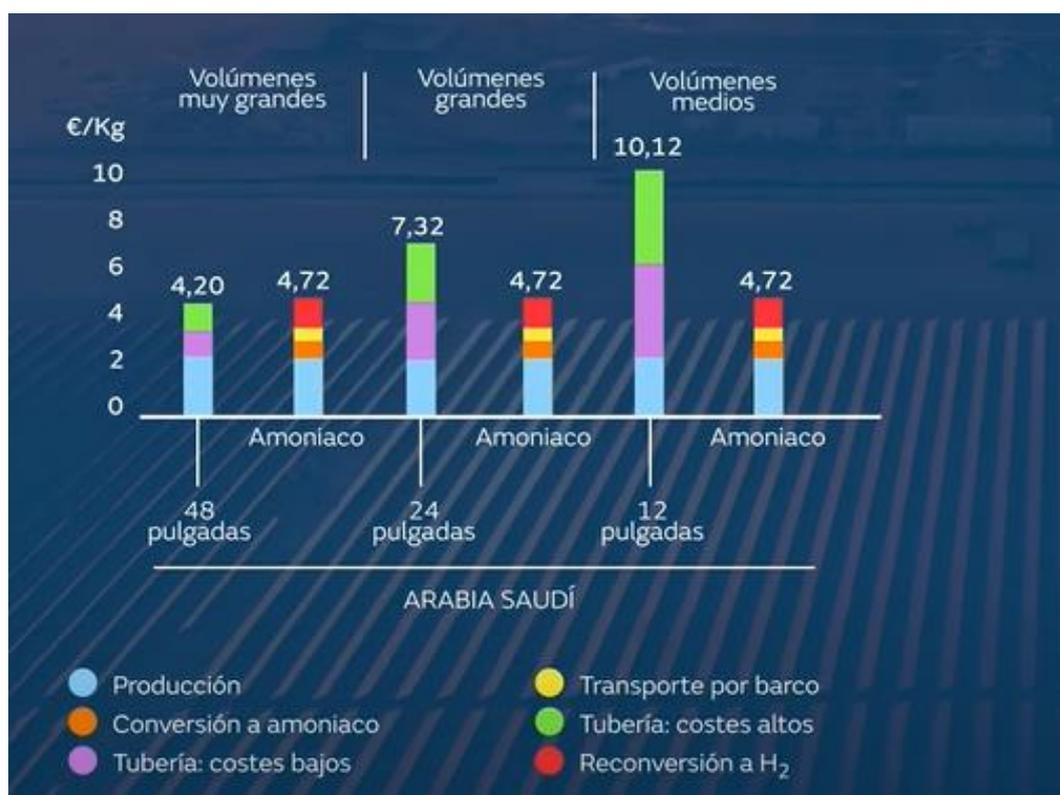


Figura 15. Transporte desde Oriente Medio (Arabia Saudí) [9].

Esta diversidad de opciones ofrece flexibilidad en la cadena de suministro de hidrógeno, permitiendo a las industrias adaptar sus estrategias de transporte según las necesidades específicas de cada región o aplicación.

En cuanto al **amoníaco** destaca como una opción preferida para el transporte intercontinental de hidrógeno debido a su densidad energética, permitiendo transportar más hidrógeno por unidad de volumen en comparación con el hidrógeno líquido.

Su capacidad para mantenerse en estado **líquido** a temperaturas relativamente moderadas, alrededor de **-33°C**, o a presiones de aproximadamente **10 bar**, lo convierte en una alternativa logística **eficiente**. Además, el proceso de producción del amoníaco mediante el método Haber-Bosch está bien establecido y cuenta con una infraestructura existente.

El amoníaco se vislumbra como una solución para proyectos a nivel global, especialmente en regiones con grandes distancias entre los puntos de producción y consumo. Su ventaja radica en la disponibilidad global de nitrógeno, extraído directamente del aire, eliminando preocupaciones sobre la escasez de materia prima.



Figura 16. Usos del amoníaco limpio [9].

Aunque ya existe una infraestructura y metodología para manejar el amoníaco, se exploran posibilidades de utilizarlo como portador de hidrógeno, permitiendo su separación al llegar al punto de consumo. Sin embargo, se plantea la necesidad de **inversiones adicionales** y posibles **pérdidas energéticas** en la **reconversión**.

La **principal desventaja** del amoníaco, como en otros portadores de hidrógeno, reside en los **costos** asociados con las etapas de **conversión** y **reconversión**, lo que impacta negativamente en el costo final del hidrógeno entregado.

La **seguridad** del suministro se convierte en un factor **crucial** al seleccionar el medio de transporte más adecuado para el hidrógeno. En el caso del transporte por tubería, la fiabilidad del suministro está vinculada tanto al país productor como a las diversas naciones atravesadas por los conductos hasta llegar a su destino final. Sin embargo, la opción marítima elimina este factor, ya que solo participan los países interesados, pudiendo estar ubicados en cualquier parte del mundo.

Utilizar amoníaco de manera limpia en el destino contribuiría a corto plazo a la estrategia de descarbonización. Por tanto, encontrar la forma más adecuada y óptima para el transporte de hidrógeno se vuelve esencial. Una combinación de tubería y barco, en forma de amoníaco, podría representar una solución viable, aplicando una logística similar a la del gas natural y contribuyendo a la seguridad del suministro hasta la zona de consumo.

Aunque el amoníaco limpio presenta ciertas aplicaciones en la descarbonización de sectores existentes, es importante destacar que, en este contexto, se considera como una alternativa secundaria frente al hidrógeno verde. Aunque puede desempeñar un papel relevante en la producción de fertilizantes y en la sustitución de combustibles contaminantes en el transporte pesado por vía marítima o aérea, el enfoque prioritario y de mayor relevancia para la descarbonización sigue siendo el hidrógeno verde.

2.5.6 Seguridad y normativa

El hidrógeno también lleva asociado ciertos riesgos y peligros los cuales no deben subestimarse. Por ello existen procedimientos y normativas creadas con el fin de extremar las precauciones y evitar los posibles riesgos ligados a su utilización. A continuación, se muestran los principales riesgos:

- **Formación de Atmósferas ATEX:**

La expresión "ATEX" se refiere a "ATmósferas EXplosivas". En este contexto, implica la presencia de atmósferas explosivas, que son mezclas inflamables de sustancias combustibles en forma de gases, vapores, nieblas o polvos en el aire. Estas atmósferas, cuando alcanzan ciertas concentraciones, pueden generar explosiones si se encuentran con una fuente de ignición.

- **Fugas de Hidrógeno:**

Las fugas de hidrógeno son motivo de preocupación debido a la naturaleza altamente inflamable del gas. Las fugas pueden ocurrir durante el transporte, almacenamiento o manipulación del hidrógeno, y deben abordarse de manera eficaz para evitar riesgos asociados con la formación de atmósferas explosivas.

- **Poder Explosivo del Hidrógeno:**

El hidrógeno tiene un amplio rango de inflamabilidad, es decir, puede arder en una amplia gama de concentraciones en el aire. Su poder explosivo se refiere a la capacidad de generar una explosión cuando entra en contacto con una fuente de ignición en condiciones adecuadas de concentración. Es esencial comprender y gestionar este riesgo, implementando medidas de seguridad para prevenir situaciones peligrosas.

Un claro ejemplo en el que se puede apreciar de forma más que llamativa este poder explosivo del hidrógeno frente a otros tipos de combustible es la siguiente figura, donde se compara el alcance entre explosiones de Gasolina, Gas Natural e Hidrógeno. Su nivel de explosividad es incluso comparable al del TNT.

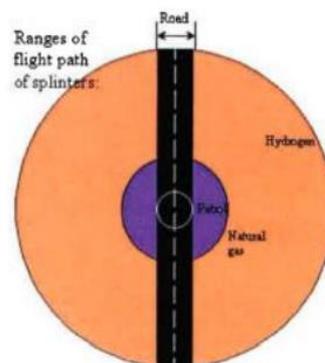


Figura 17. Poder explosivo del hidrógeno frente a otros combustibles.

Dada la combinación de este factor con las elevadas presiones asociadas al almacenamiento y distribución, se vuelve imperativa la formulación de normativas y regulaciones específicas. Estas medidas buscan garantizar la seguridad, mitigar riesgos y establecer protocolos que minimicen cualquier eventualidad:

- **Real Decreto 681/2003 del 12 de junio:**

Esta normativa en España establece las condiciones y requisitos para la gestión y eliminación de residuos generados en las instalaciones nucleares y radiactivas. Regula aspectos como la clasificación de residuos, los procedimientos de gestión, y las responsabilidades de los productores y gestores de residuos radiactivos.

- **Real Decreto 144/2016 del 8 de abril:**

Este decreto en España regula las instalaciones de recarga de vehículos eléctricos. Establece los requisitos técnicos y de seguridad para la instalación de puntos de recarga, así como las condiciones para su autorización y funcionamiento. Contribuye al fomento de la movilidad eléctrica y la infraestructura de carga asociada.

- **ISO 14687-2:**

Esta norma internacional especifica los requisitos de calidad del hidrógeno utilizados como combustible en celdas de combustible de vehículos. Define parámetros como la composición química, impurezas permitidas y métodos de muestreo para garantizar la seguridad y eficiencia en la utilización del hidrógeno como combustible.

- **ANSI/AIAA G-095A-2017:**

Esta norma americana, desarrollada por la American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) y la American National Standards Institute (ANSI), aborda la evaluación y mitigación de riesgos asociados con la presencia de hidrógeno en sistemas aeroespaciales. Proporciona pautas para el diseño, operación y mantenimiento seguros de sistemas que involucran hidrógeno.

3. Implementación del hidrógeno en el mundo de la aviación

3.1 Infraestructura aeroportuaria

La infraestructura aeroportuaria del hidrógeno desempeña un **papel crucial** en la distribución eficiente y segura de este vector energético en el sector de la aviación. La transición hacia una aviación más sostenible y descarbonizada exige la implementación de sistemas avanzados que permitan el suministro y manejo de hidrógeno en los aeropuertos. Cada aeródromo, dependiendo de su tamaño, tráfico y planes de expansión, enfrenta desafíos únicos en la creación de infraestructuras adaptadas a las necesidades específicas del hidrógeno.

La **inversión** y el **tamaño** de la infraestructura **varían** significativamente **según** la escala y la complejidad de cada **aeropuerto**. Aquellos con un elevado volumen de tráfico aéreo y una extensa red de rutas internacionales pueden requerir instalaciones más extensas y sofisticadas para satisfacer la demanda de hidrógeno. En contraste, aeropuertos más pequeños o regionales pueden optar por soluciones más escalables y ajustadas a sus necesidades específicas.

La infraestructura aeroportuaria del hidrógeno abarca desde estaciones de carga y almacenamiento hasta sistemas de abastecimiento en las áreas de estacionamiento y hangares. La ubicación estratégica de estas instalaciones es esencial para garantizar un suministro eficaz y oportuno a las aeronaves.

En este contexto, la planificación y el diseño cuidadosos de la infraestructura se convierten en elementos fundamentales para maximizar la eficiencia operativa y reducir la huella ambiental en el entorno aeroportuario.

3.1.1 Estaciones de recarga

Las estaciones de recarga de hidrógeno desempeñan un papel fundamental en la infraestructura aeroportuaria dedicada al suministro de energía limpia para aeronaves. Su diseño y ubicación estratégica son esenciales para garantizar una operación eficiente y segura en el entorno aeroportuario.

- **Capacidades y Rápida Recarga:**

Enfocadas en garantizar una entrega eficiente de hidrógeno a los vehículos de handling, estas estaciones cuentan con sistemas de recarga rápida. Se realizan análisis de capacidad para determinar cuántos vehículos pueden ser atendidos simultáneamente, estableciendo tiempos de recarga optimizados.

- **Seguridad y Protocolos:**

Medidas de seguridad específicas para la manipulación segura del hidrógeno durante el proceso de recarga de los vehículos de handling son implementadas. Además, se establecen protocolos de respuesta a emergencias adaptados a la logística de manejo y transporte del hidrógeno en el entorno aeroportuario.

- **Automatización y Control:**

Para agilizar la operación y minimizar la intervención humana, estas estaciones incorporan sistemas de automatización de procesos. Se garantiza una recarga precisa y eficiente mediante sistemas de control avanzados que supervisan continuamente el estado de las estaciones y la flota de vehículos de handling.

- **Compatibilidad con Diferentes Aeronaves:**

Diseñadas para adaptarse a las necesidades específicas de diversas aeronaves, estas estaciones aseguran una distribución versátil de hidrógeno según los requisitos de cada modelo. Consideran la diversidad de tamaños y configuraciones de aeronaves presentes en el aeropuerto.

- **Eficiencia Logística:**

Buscando una integración eficiente con las operaciones de handling, estas estaciones minimizan tiempos de inactividad y optimizan las rutas de entrega de hidrógeno a las aeronaves. La eficiencia logística contribuye a la puntualidad en la entrega de hidrógeno y mejora la operatividad aeroportuaria.

- **Monitoreo Ambiental:**

Incorporan sistemas para evaluar y controlar el impacto ambiental de la operación, considerando la emisión de gases y la gestión adecuada de residuos asociados al hidrógeno.

- **Integración con Infraestructuras Existentes:**

Estas estaciones se integran sin problemas con otras infraestructuras aeroportuarias, coordinando su funcionamiento con sistemas eléctricos y de manejo de aeronaves. La integración asegura una transición eficiente hacia la implementación de vehículos de handling impulsados por hidrógeno.

Estas estaciones de recarga especializadas representan un componente vital para la transición hacia una cadena logística de hidrógeno eficiente y sostenible en los aeropuertos, respaldando la descarbonización del transporte aéreo y mejorando la operación aeroportuaria en su conjunto.

3.1.1.1 Hidrogeneras

Las hidrogeneras son estaciones de abastecimiento de hidrógeno, esenciales para impulsar la movilidad sostenible y la utilización del hidrógeno verde como alternativa energética. En España, se aspira a contar con más de 100 hidrogeneras para 2030.

Este hidrógeno verde se produce mediante electrólisis con electricidad renovable, destacándose como una opción vital para la descarbonización del transporte y la promoción de la movilidad sostenible.

Los vehículos que utilizan hidrógeno, disponibles desde hace más de una década, representan el siguiente paso en la evolución al emplear hidrógeno obtenido de fuentes renovables. Estos vehículos ofrecen una mayor autonomía y menos dependencia de baterías, además de tiempos de repostaje comparables a los de los vehículos de combustión. Sin embargo, para que esta realidad se afiance, es crucial expandir la red de hidrogeneras.

El proceso de abastecimiento en una hidrogenera se asemeja al de una gasolinera convencional, aunque con detalles distintivos. Dado que el hidrógeno se suministra a alta presión y es altamente volátil, la conexión entre el vehículo y el surtidor debe ser hermética. El hidrógeno se carga en el depósito del vehículo, alimentando la pila de combustible que genera electricidad para propulsar el vehículo. El único subproducto es vapor de agua expulsado por el tubo de escape.

Una **estación** de servicio **ideal** sería la que incorpora **paneles fotovoltaicos** en una cubierta plana o en un entorno muy cercano. Esto iría ligado a ubicar el sistema complementario de producción de hidrógeno también, hablamos de compresor, electrolizador y punto de suministro, además del depósito donde se pueda almacenar el hidrógeno.

A diferencia de las gasolineras convencionales, el hidrógeno se vende por kilogramo, no por litro. El tiempo de repostaje de un autobús de hidrógeno, que suele tener una capacidad de entre 30 y 37.5 kilogramos, no supera los 12 minutos. Se estima que un autobús de hidrógeno consume aproximadamente 8 kilogramos por cada 100 kilómetros, proporcionando una autonomía de alrededor de 400 kilómetros para los vehículos de hidrógeno disponibles en el mercado.



Figura 18. Hidrogeneras existentes en la UE.

Es evidente que en países centroeuropeos como Alemania, Holanda o Bélgica hay una red de estas infraestructuras superior a la existente en países como el nuestro.

Ahora bien, integrar las hidrogeneras en un Aeropuerto, que es uno de los principales objetivos de este trabajo se presenta como una estrategia clave para potenciar la movilidad sostenible en el ámbito aeroportuario, especialmente para los vehículos de handling.

Considerando la extensión y la intensidad operativa del aeropuerto en cuestión, se pueden proyectar la ubicación o ubicaciones estratégicas de las hidrogeneras dedicadas a atender la demanda de repostaje de los vehículos de handling. Por ejemplo, se podría establecer una zona específica de repostaje de hidrógeno en las proximidades de las zonas establecidas para estacionar vehículos, y dependiendo del tamaño del aeropuerto o la extensión de este y sus terminales, escoger un número eficiente de hidrogeneras.

Este enfoque permitiría una cobertura efectiva y eficiente para garantizar el suministro de hidrógeno, contribuyendo así a la descarbonización de las operaciones de tierra y promoviendo prácticas sostenibles en la infraestructura aeroportuaria.

La determinación del número adecuado de hidrogeneras en un aeropuerto como el de Madrid-Barajas, en comparación con aeropuertos de menor tamaño como Valencia o Alicante, implica considerar varios factores. En aeropuertos más grandes, donde existen un mayor número de operaciones y por consiguiente una mayor flota de vehículos de handling, se requeriría una cantidad proporcionalmente mayor de hidrogeneras para satisfacer la demanda, estaríamos hablando de unas 3 hidrogeneras. Factores importantes como la extensión de las operaciones y el flujo de vehículos afectarían la necesidad de puntos de recarga, en esta casuística entraría la existencia de una terminal satélite, donde se podría ubicar una extra.

En el caso de aeropuertos más pequeños, donde la actividad operativa es menor, se podría justificar un número menor de hidrogeneras, adaptando la infraestructura de recarga a las necesidades específicas de esos aeropuertos. La eficiencia y capacidad de carga de las hidrogeneras también juegan un papel fundamental, ya que aeropuertos con menos operaciones podrían beneficiarse con instalaciones más compactas y versátiles.

Estas hidrogeneras se ubicarían estratégicamente cerca de las zonas de estacionamiento de vehículos de handling en las proximidades de la plataforma para minimizar tiempos y distancias.



Figura 19. Imagen de hidrogenera.

El precio de las hidrogeneras dependerá significativamente del tamaño, la capacidad y la tecnología de esta. Pueden clasificarse en estaciones pequeñas, medianas y grandes, cada una con características y costes distintos. Además, los avances tecnológicos y la demanda del mercado también influyen en los precios. De modo que las hidrogeneras de menor capacidad, de hasta 100 kg/día, suelen costar alrededor de unos 0,5 millones de euros. Las hidrogeneras de mayor capacidad, de hasta 1000 kg/día, suelen costar entre 1 y 2 millones de euros [10].

Tamaño de la Estación	Capacidad de Producción	Coste de Construcción	Coste de Mantenimiento Anual
Pequeña	1-10 kg/minuto	50-100 mil €	10-20 mil €
Mediana	10-100 kg/minuto	100-500 mil €	20-50 mil €
Grande	100-1000 kg/minuto	500-2 millones €	50-100 mil €

Tabla 5. Propiedades del hidrógeno frente a combustibles convencionales [11].

Actualmente el hidrógeno se encuentra alrededor de 3-6 € por kilogramo, lo cual desemboca en que, para un depósito de unos 500 km de autonomía, estaríamos hablando de un coste total cercano a los 40€ [10].

Esto en la actualidad supone un coste muy inferior al que podemos encontrar en los combustibles tradicionales, lo cual nos vierte una ventaja también de cara al usuario en cuanto a precios.

Es importante destacar que los **precios** pueden **variar** según la región y las condiciones del **mercado**. Las variaciones del precio vendrán determinadas por tres factores principales:

- **Coste** de la **electricidad** utilizada en el proceso de electrólisis.
- **Coste** de la **planta** de electrólisis. Cuanto mayor sea la potencia instalada, la ratio €/MW disminuirá.
- **Horas** de **funcionamiento** de la planta productora. De forma que cuanto más largos sean los períodos de duración, más económico será el hidrógeno verde.

En general, el coste de una hidrogenera es un factor importante para tener en cuenta al planificar la adopción de vehículos de hidrógeno. Sin embargo, el coste del hidrógeno producido por una hidrogenera está disminuyendo, y se espera que continúe disminuyendo en el futuro. Esto podría hacer que las hidrogeneras sean más asequibles y competitivas con las estaciones de servicio tradicionales.

3.1.2 Tuberías y conducciones

La provisión de hidrógeno a las aeronaves no se limita únicamente al uso de camiones o tanques, existe la viabilidad de implementar una red eficiente de tuberías. Esta red tendría la capacidad de transportar el hidrógeno desde las áreas de almacenamiento o tanques hasta los puntos de suministro ubicados en las zonas de estacionamiento de aeronaves. Allí, a través de un vehículo equipado, se realizaría el bombeo del hidrógeno directamente a la aeronave.

- **Diseño de Red de Tuberías:**

El diseño de la red de tuberías se adapta a la distribución óptima de hidrógeno desde las estaciones de producción o almacenamiento hasta los puntos de estacionamiento de las aeronaves. Se considera la disposición geográfica del aeropuerto, la ubicación estratégica de las pistas y la proximidad a las zonas de carga y descarga.

- **Material y Seguridad:**

Se seleccionan materiales resistentes y seguros para las tuberías que transportarán el hidrógeno, asegurando la integridad del sistema y minimizando riesgos asociados con la presión y las propiedades del hidrógeno. Los protocolos de seguridad se integran para prevenir fugas y garantizar una manipulación segura.

- **Capacidad y Presión:**

El dimensionamiento de la red de tuberías se realiza considerando la capacidad de suministro requerida para las diferentes aeronaves y la presión necesaria para garantizar un flujo constante. Se llevan a cabo análisis de capacidad para ajustar la infraestructura a las demandas variables de hidrógeno.

- **Adaptabilidad a Diversos Modelos de Aeronaves:**

La red de tuberías se diseñará para adaptarse a la diversidad de modelos de aeronaves presentes en el aeropuerto. Se consideran los distintos puntos de conexión en las aeronaves y las variaciones en los requisitos de suministro de hidrógeno según el tipo de avión.

- **Sistemas de Monitoreo Continuo:**

Se implementan sistemas avanzados de monitoreo continuo para supervisar la presión, el flujo y la calidad del hidrógeno a lo largo de la red de tuberías. La monitorización en tiempo real permite una respuesta rápida ante cualquier anomalía y garantiza la operación segura del sistema.

- **Integración con la Infraestructura Aeroportuaria:**

La red de tuberías se integra sin problemas con otras infraestructuras aeroportuarias, coordinando su funcionamiento con sistemas eléctricos, estacionamientos y áreas de mantenimiento de aeronaves. La integración facilita la incorporación del hidrógeno como fuente de energía en la operación diaria del aeropuerto.

- **Sostenibilidad Ambiental:**

La implementación de la red de tuberías considera prácticas sostenibles y medidas para reducir el impacto ambiental. Se evalúa la eficiencia energética de la infraestructura y se exploran opciones para la generación de hidrógeno verde, utilizando fuentes de energía renovable.

Para el diseño de una red de tuberías eficiente y segura existe el **Código ASME B31.12** para el **transporte de hidrógeno** [12].

En el contexto de la creciente demanda de hidrógeno como portador de energía clave para un futuro sostenible, surge la imperante necesidad de contar con una infraestructura segura y eficiente. La Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos (**ASME**) reconoció esta urgencia y respondió con el desarrollo del código ASME B31.12, específicamente diseñado para guiar el diseño, construcción y operación de sistemas de tuberías y gasoductos de hidrógeno.

A continuación, exploraremos las características y contenidos clave de este código:

- **Alcance y aplicabilidad:**

El alcance del código abarca tanto sistemas de tuberías de hidrógeno gaseoso a alta presión como sistemas de tuberías de hidrógeno líquido. Aplica a sistemas estacionarios, cubriendo instalaciones de producción, almacenamiento, distribución y utilización. Componentes como tuberías, accesorios, válvulas, recipientes a presión y equipos asociados son considerados.

- **Consideraciones de diseño:**

Diversas consideraciones de diseño son establecidas, incluyendo la determinación de la presión de diseño, temperatura, selección de materiales, análisis de esfuerzos y factores de seguridad. El código provee directrices para calcular el espesor de pared requerido, considerando la presión interna y externa, temperatura y asignaciones de corrosión. Aborda aspectos relacionados con las propiedades específicas del hidrógeno, como fragilización y permeación.

- **Selección de materiales:**

Debido a las propiedades únicas del hidrógeno, que pueden causar fragilización en ciertos materiales, el código especifica criterios para la selección de materiales, garantizando compatibilidad e integridad a largo plazo. Identifica materiales adecuados y proporciona pautas para pruebas, verificación y documentación.

- **Construcción y fabricación:**

El código establece requisitos para la construcción y fabricación de sistemas de tuberías de hidrógeno, cubriendo procedimientos de soldadura, diseño de juntas, control de calidad y técnicas de inspección. Se destaca la necesidad de personal calificado, técnicas de soldadura adecuadas y métodos de examen no destructivo para mantener la integridad del sistema.

- **Inspección y pruebas:**

Para garantizar seguridad y confiabilidad, el código define requisitos de inspección y pruebas, incluyendo pautas para inspecciones visuales, técnicas de examen no destructivo, pruebas de presión y detección de fugas. Se enfatiza la importancia de inspecciones periódicas y mantenimiento para asegurar la integridad continua del sistema.

- **Consideraciones de seguridad:**

La seguridad es una preocupación central, y el código aborda consideraciones asociadas con el hidrógeno, incluyendo peligros de incendio y explosión, detección de fugas y procedimientos de cierre de emergencia. Promueve el uso de dispositivos de seguridad, como válvulas de alivio de presión y sensores de hidrógeno, para mitigar riesgos y proteger al personal y al medio ambiente.

- **Cumplimiento normativo y aplicación del código:**

Ampliamente reconocido y adoptado por autoridades regulatorias, el código garantiza el cumplimiento de estándares de la industria y requisitos legales. El cumplimiento se hace cumplir mediante inspecciones y auditorías realizadas por organismos reguladores, demostrando compromiso con la seguridad y las mejores prácticas de la industria.

- **Ventajas e impacto:**

La implementación del código ofrece un marco estandarizado para el diseño y construcción de infraestructura de hidrógeno, promoviendo consistencia e interoperabilidad. Mejora la seguridad al abordar características y peligros únicos del hidrógeno. Además, contribuye al avance de la tecnología del hidrógeno al fomentar la investigación, desarrollo e innovación, facilitando la colaboración entre profesionales, investigadores y reguladores.

En conclusión, el código ASME B31.12 desempeña un papel crucial en dar forma al futuro de la infraestructura del hidrógeno, asegurando la seguridad, integridad y confiabilidad de los sistemas, y acelerando el crecimiento de la industria del hidrógeno en línea con la creciente demanda.

3.1.3 Áreas de almacenamiento

La infraestructura aeroportuaria dedicada a las áreas de almacenamiento de hidrógeno desempeña un papel crucial en la transición hacia el uso generalizado de esta fuente de energía en la aviación. El diseño y operación eficientes de estas áreas son esenciales para garantizar un suministro continuo y seguro de hidrógeno a las aeronaves.

- **Distribución Estratégica:**

Las áreas de almacenamiento están estratégicamente ubicadas para garantizar una distribución eficiente del hidrógeno a lo largo del aeropuerto. La proximidad a las estaciones de producción, puntos de recarga y áreas de estacionamiento de aeronaves se planifica para minimizar pérdidas por transporte y optimizar la logística.

- **Capacidad de Almacenamiento:**

El dimensionamiento de las áreas de almacenamiento se realiza considerando la capacidad total requerida para satisfacer las demandas operativas del aeropuerto. Se evalúa la variabilidad en la demanda de hidrógeno en función del tipo y cantidad de aeronaves que requieren suministro, así como las necesidades de almacenamiento temporal.

En el caso de aeropuertos con un alto volumen de operaciones y aeronaves, se requerirían varios puntos de almacenamiento distribuidos en diferentes zonas de este.

- **Seguridad y Normativas:**

Las áreas de almacenamiento cumplen rigurosos estándares de seguridad y normativas establecidas para el manejo de hidrógeno. Se implementan sistemas de detección de fugas, dispositivos de seguridad y protocolos de respuesta ante emergencias para garantizar la protección de los trabajadores y las instalaciones.

- **Tecnologías de Almacenamiento:**

Se utilizan diversas tecnologías de almacenamiento de hidrógeno, como tanques criogénicos para almacenamiento líquido o tanques a presión para almacenamiento gaseoso. La elección de la tecnología se basa en factores como la eficiencia, la seguridad y la adaptabilidad a las condiciones operativas específicas del aeropuerto.

- **Integración con la Red de Tuberías:**

Las áreas de almacenamiento se integran sin problemas con la red de tuberías para facilitar la distribución eficiente del hidrógeno. Se establecen puntos de conexión estratégicos para cargar y descargar hidrógeno, coordinando el flujo entre las áreas de almacenamiento y los puntos de suministro.

- **Monitoreo Continuo:**

Sistemas avanzados de monitoreo continuo supervisan las condiciones de almacenamiento, incluida la temperatura, la presión y la calidad del hidrógeno. El

monitoreo en tiempo real permite una gestión proactiva y la identificación temprana de posibles problemas, asegurando un almacenamiento seguro y eficiente.

- **Actualización y Expansión:**

Las áreas de almacenamiento están diseñadas para ser escalables, permitiendo futuras expansiones de capacidad según las necesidades del aeropuerto y el crecimiento en la adopción de hidrógeno en la aviación. Los planes de actualización se elaboran considerando avances tecnológicos y cambios en la demanda.

- **Sostenibilidad y Eficiencia:**

Se implementan prácticas sostenibles en las áreas de almacenamiento, explorando opciones para la generación de hidrógeno verde y maximizando la eficiencia energética en los procesos de almacenamiento. La sostenibilidad ambiental se integra como un principio rector en el diseño y operación de estas áreas.

Las áreas de almacenamiento de hidrógeno constituyen un componente esencial en la infraestructura aeroportuaria enfocada en la transición hacia una aviación más sostenible y descarbonizada, asegurando la disponibilidad confiable de hidrógeno para impulsar las aeronaves de manera segura y eficiente.

3.1.3.1 Tanques de H₂

Cuando se trata de almacenar hidrógeno, especialmente para vehículos con celdas de combustible y aplicaciones energéticas, los tanques a alta presión están a la vanguardia. Estos tanques son dispositivos diseñados para contener hidrógeno gaseoso a presiones significativamente superiores a la presión atmosférica. Este método de almacenamiento se ha consolidado como una opción eficiente y segura para el transporte y la distribución de hidrógeno, así como para su aplicación en diversos sectores.

Los tanques de alta presión utilizan materiales resistentes y tecnologías avanzadas para garantizar la contención segura del hidrógeno a presiones que pueden variar según la aplicación específica. Estos tanques se han convertido en una solución clave para superar los desafíos asociados con el almacenamiento y transporte del hidrógeno, ofreciendo una forma compacta y eficiente de mantener este gas limpio y listo para su uso inmediato.

Estos tanques suelen diseñarse para soportar presiones de 350 bares o incluso 700 bares, lo que permite almacenar el hidrógeno a altas presiones para su uso en aplicaciones de celdas de combustible y vehículos de hidrógeno. La capacidad de alcanzar estas altas presiones es esencial para maximizar la densidad de almacenamiento y, por ende, la eficiencia del transporte y la utilización de hidrógeno.

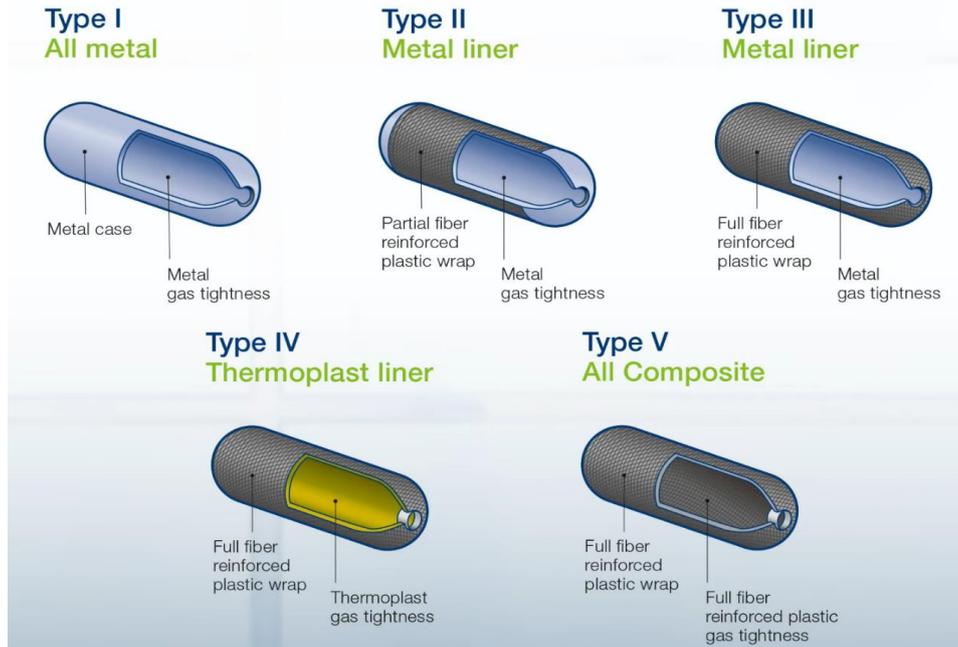


Figura 20. Tipos de tanque de almacenamiento de H₂ gaseoso según las especificaciones requeridas [13].

De la figura anterior, podemos observar diferentes tipos de tanques entre los que el más adecuado para almacenar hidrógeno a mayores presiones y concentración es el tipo IV, que es una evolución del III. Pues a diferencia del V, es capaz de mantener el combustible en su interior, ya que en este último se producen migraciones al ser el hidrógeno la molécula más pequeña [13].

Además, el almacenamiento a alta presión es esencial para satisfacer las demandas de vehículos con celdas de combustible, donde la eficiencia y la densidad energética son cruciales. Estos sistemas permiten una rápida recarga de los vehículos y una mayor autonomía, contribuyendo así a la viabilidad y aceptación de los vehículos de hidrógeno en el mercado.

Estos tanques a menudo están fabricados con materiales compuestos como el polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) y el polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP). ¿La razón? Buscan lograr el equilibrio perfecto entre resistencia y peso.

La elección de materiales compuestos, como se puede apreciar en la figura 21, permite obtener tanques que son robustos y livianos al mismo tiempo. La combinación de fibras de carbono y vidrio proporciona una estructura que puede resistir las demandas de alta presión del hidrógeno, asegurando al mismo tiempo una solución ligera y duradera para el almacenamiento eficiente de este gas.

No obstante, es importante tener en cuenta que, a medida que avanzan las investigaciones en almacenamiento de hidrógeno, también se exploran otras tecnologías complementarias, como el almacenamiento líquido de hidrógeno y el almacenamiento en forma de hidruros metálicos, cada uno con sus propias ventajas y desafíos. Estas innovaciones buscan mejorar la eficiencia y la seguridad del almacenamiento de hidrógeno, impulsando su papel en la transición hacia una economía más sostenible y basada en energías limpias.

En contraste con el almacenamiento gaseoso de hidrógeno, la **opción líquida** implica almacenar el hidrógeno en forma líquida a temperaturas extremadamente bajas, alrededor de -253 grados Celsius. Este enfoque aprovecha las propiedades criogénicas del hidrógeno, permitiendo que el gas se transforme en un líquido denso

que ocupa un volumen mucho menor. La principal ventaja radica en la presión necesaria para almacenar hidrógeno en estado líquido, que es considerablemente menor que en su forma gaseosa. Sin embargo, este método también presenta desafíos significativos, como la necesidad de mantener temperaturas criogénicas y el uso de tecnologías y materiales específicos para garantizar la seguridad y eficiencia del almacenamiento. La elección entre almacenamiento gaseoso y líquido dependerá de las aplicaciones particulares, costos asociados y requisitos logísticos, buscando un equilibrio óptimo entre presión, temperatura y eficiencia para una implementación efectiva.

En el campo de almacenamiento de hidrógeno la empresa H2 Clipper ha desarrollado el "Hydrogen Depot" se presenta como una solución integral compatible tanto con la tecnología Clipper como con la Tecnología de Tubería Segura (PIP).



Figura 21. Prototipo Hydrogen Depot [14].

Estos depósitos de hidrógeno puro reciben una admisión de hidrógeno líquido a -250 grados Celsius, que se almacena para su distribución local. La versatilidad de estos depósitos se refleja en su capacidad para admitir tanto tomas de hidrógeno líquido como gaseoso, brindando flexibilidad en el suministro de este recurso esencial.

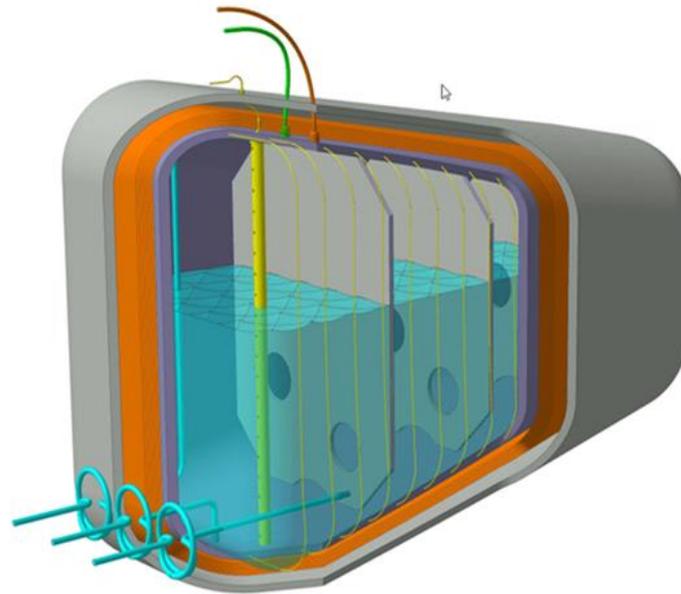


Figura 22. Tanque criogénico de hidrógeno (Almacenamiento líquido) [15].

Los **tanques criogénicos** son dispositivos de almacenamiento diseñados específicamente para contener hidrógeno líquido a temperaturas extremadamente bajas. Están compuestos por **dos capas**, una interna y otra externa, con el espacio intermedio evacuado para crear un vacío. Esta estructura ayuda a minimizar las transferencias de calor, preservando las propiedades criogénicas del hidrógeno y evitando la evaporación prematura [15].

Además, los tanques criogénicos suelen incorporar sistemas avanzados de aislamiento térmico para mantener las temperaturas adecuadas. Estos sistemas incluyen materiales aislantes de alto rendimiento, como espumas y láminas reflectantes, que contribuyen a mantener la eficiencia del almacenamiento a temperaturas criogénicas.

La elección de tanques para el almacenamiento de hidrógeno en la aviación comercial se enfrenta a limitaciones específicas. Los tanques de cohetes, a pesar de su eficiencia, presentan una durabilidad demasiado corta para cumplir con los requisitos de la aviación comercial.

Por otro lado, los tanques diseñados para automóviles no son la opción prioritaria debido a que la prioridad no recae en la minimización extrema del peso. En consecuencia, se hace imperativo desarrollar tanques óptimos específicamente adaptados a las necesidades de la aviación comercial, que sean duraderos, livianos y, sobre todo, seguros.

Además, es fundamental considerar diversos aspectos para garantizar la seguridad de estos tanques. Esto incluye diferentes pruebas a las que se puedan someter como:

- Pruebas de **presión**: determinar la capacidad de los tanques para manejar presiones específicas.
- Pruebas de **impacto por caída**: verificar la resistencia a impactos al caer o golpes con objetos.

- Pruebas de **resistencia al fuego**: evaluar la reacción del tanque frente a situaciones de fuego.
- Pruebas de **penetración**: determinar la capacidad del tanque para resistir la penetración.
- Pruebas de **ciclos**: evaluar el comportamiento del tanque en ciclos repetidos de presurización y despresurización y controlar la aparición de la fatiga.
- Pruebas de **permeación**: analizar la resistencia del tanque contra la fuga de hidrógeno.
- Pruebas **ambientales**: evaluar el rendimiento del tanque en diversas condiciones ambientales.

Estos procedimientos garantizan la seguridad integral de los tanques de almacenamiento de hidrógeno en diversas situaciones y aplicaciones.

También podemos hacer una **clasificación** de tipos de tanques según los siguientes criterios:

- **Según su estructura/anclaje al fuselaje:**

Los tanques **no integrales** cumplen la función exclusiva de contener combustible y se montan dentro del fuselaje, sostenidos por una estructura convencional de revestimiento, larguero y armazón. En este caso, solo necesitan soportar las **cargas** asociadas con la **contención** del combustible, como las cargas de presurización y dinámicas, además de las tensiones térmicas.

Por otro lado, los tanques **integrales** son **parte** integral de la estructura básica del **fuselaje**, lo que implica que deben resistir todas las tensiones axiales, de flexión y de cizallamiento típicas del fuselaje, además de las cargas mencionadas anteriormente. Debido a que la superficie externa del diseño del tanque integral no está protegida por la estructura del fusible, como en el caso no integral, se requiere una capa protectora sobre el aislamiento para proporcionar defensa contra el calentamiento aerodinámico y las cargas de aire que, de lo contrario, podrían causar daños estructurales en el aislamiento.

- **Según su forma:**

Los tanques de forma **esférica** presentan una **superficie mínima** para un volumen dado, lo que reduce el flujo de calor pasivo hacia el tanque y, consecuentemente, la evaporación de LH2. Sin embargo, la fabricación de formas esféricas plantea desafíos y conlleva un área frontal más grande, generando mayores fuerzas de arrastre en comparación con los tanques cilíndricos.

Por otro lado, los tanques **cilíndricos** son más **fáciles de fabricar**, pero tienen una relación área de superficie a volumen más alta, resultando en una carga de calor pasivo mayor. No obstante, debido a su facilidad de integración en el fuselaje tubular, ofrecen una mayor eficiencia volumétrica. Por estas razones, se prefieren los tanques de forma cilíndrica. En el caso del depósito de popa, situado en el cono de cola, su forma no será puramente cilíndrica, sino cónica para adaptarse a la forma del fuselaje de popa. Esto implica una penalización de peso y un aumento de longitud en el tanque de popa para compensar esta adaptación.

- **Según su aislamiento:**

La complejidad del aislamiento interior radica en que debe ser **impermeable** al H₂. Dado que el aislamiento está constantemente expuesto al hidrógeno, la difusión de H₂ hacia la pared del tanque podría igualar la conductividad térmica del aislamiento con la del H₂, anulando su eficacia.

Cuando el aislamiento se aplica en la superficie exterior de los tanques, la estructura del tanque experimenta expansiones y contracciones significativas durante la carga y descarga de LH₂.

Este escenario plantea desafíos sustanciales para la fijación del sistema de soporte estructural, no solo debido a los cambios dimensionales que deben considerarse, sino también por el riesgo potencial de fugas térmicas. El aislamiento externo también es más vulnerable al daño mecánico y debe ser hermético al aire.

La modificación principal en la arquitectura de aeronaves existente implica el almacenamiento del combustible en **tanques** altamente aislados dentro del **fuselaje** en lugar de en las alas.

Aparte de los tanques, las diferencias clave entre ambos combustibles se centran en la geometría y masa del fuselaje y el ala, así como en el costo operativo directo de la aeronave. Debido a la ubicación de los tanques de combustible en el fuselaje, tanto su **geometría** como su **masa** se ven **afectadas**.

En el caso de aviones de **medio y largo alcance**, el combustible se almacena en **dos** tanques **separados**. El primer tanque se sitúa entre la cabina de vuelo y la cabina de pasajeros, mientras que el segundo tanque está integrado en el cono de cola. Esta configuración asegura una asignación adecuada del centro de gravedad de la aeronave, pero no permite la transferencia de combustible entre tanques [16].

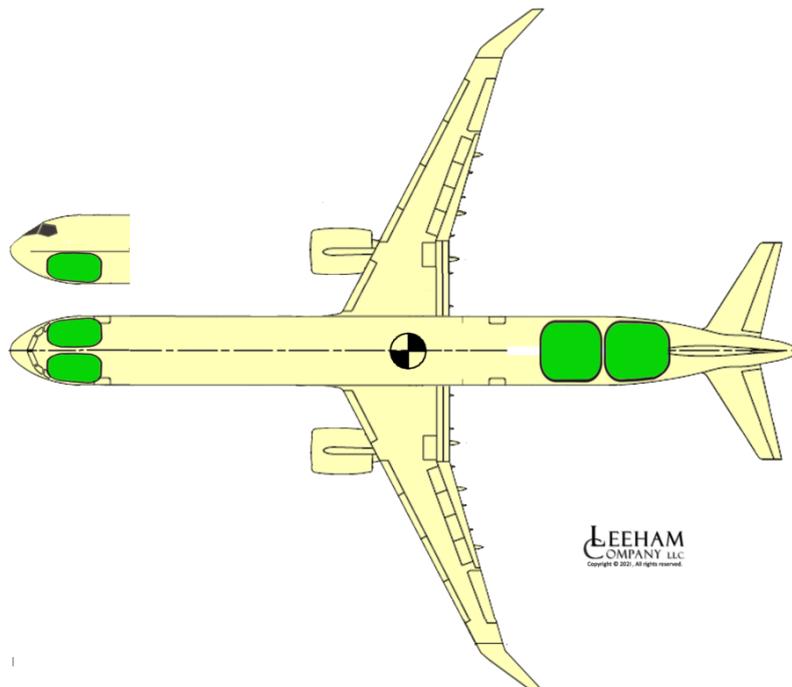


Figura 23. Ubicación de tanques de almacenamiento H₂ en avión medio-largo alcance [16].

En aviones de **corto alcance**, un solo tanque en el cono de cola suele ser suficiente para las rutas previstas [17].



Figura 24. Ubicación de tanque de almacenamiento H2 en avión de corto alcance [17].

Con el combustible almacenado fuera del ala, la masa del ala se ve afectada. La masa de combustible contrarresta el momento de flexión en la raíz del ala causado por la sustentación generada. Este **alivio** del **momento** de flexión en la raíz del ala desaparece cuando se utiliza hidrógeno, resultando en un **aumento** de la **masa** del **ala**.

La ausencia del efecto amortiguador del combustible sugiere que se podría experimentar aleteo a coeficientes de sustentación más bajos en aeronaves propulsadas por hidrógeno.

3.1.4 Infraestructura fotovoltaica

En este contexto, las instalaciones fotovoltaicas desempeñarían un **papel crucial** como proveedoras de energía renovable para impulsar la producción de hidrógeno mediante electrólisis. Una estrategia ideal sería ubicar paneles solares en las proximidades del aeropuerto, tomando como ejemplo la iniciativa del aeropuerto de Madrid-Barajas.

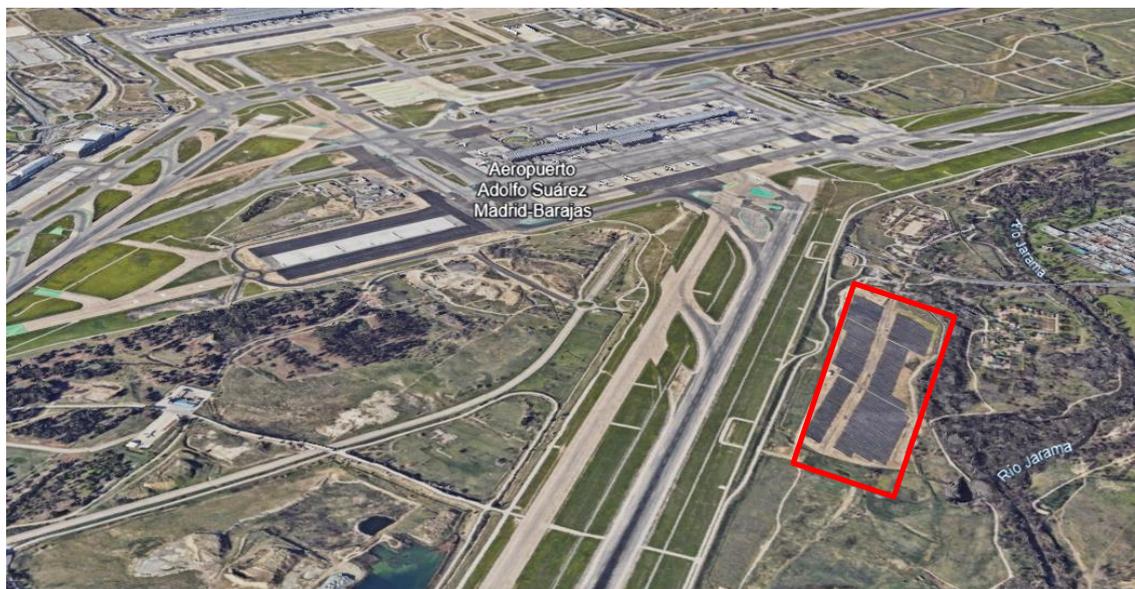


Figura 25. Ubicación parque solar en Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas [18].

Estos paneles no solo podrían abastecer al suministro de energía general utilizada en las diversas actividades dentro del aeropuerto, sino que también podrían abastecer la energía necesaria para la generación de hidrógeno.

Alternativamente, si no existe terreno suficiente, se podría considerar la instalación de estas infraestructuras fotovoltaicas en las cubiertas de edificios existentes o en estaciones de hidrógeno, aprovechando así los espacios disponibles de manera eficiente.

Ahora bien, estos campos solares han de ser diseñados de manera adecuada, siguiendo esta metodología:

Será esencial realizar un estudio detallado de la ubicación antes de instalar los paneles solares, considerando en primer lugar que la inclinación adecuada para los soportes de los paneles fotovoltaicos es de 30° . La orientación escogida dependerá de la situación geográfica en la que nos encontremos, pero para el caso de España, los paneles irán orientados hacia el sur, que es la dirección que mayor radiación recibe a lo largo de las cuatro estaciones del año.

Otro aspecto importante será encontrar la ubicación óptima antes de instalar los paneles solares, considerando especialmente la posibilidad de sombreado. La presencia de objetos, como árboles, edificios cercanos u otras estructuras puede afectar significativamente a la eficiencia de las placas solares al bloquear la incidencia directa de la radiación solar. Por ello, se recomienda llevar a cabo un análisis exhaustivo de la disposición del entorno para garantizar una generación óptima de energía solar y maximizar el rendimiento del sistema fotovoltaico.

La producción eléctrica es máxima a las 12:00 am, cuando no hay posibilidad de proyección de sombras y la incidencia de la radiación solar es directa.

De la misma forma será fundamental considerar la separación adecuada entre las filas de paneles solares durante la planificación e instalación. Este aspecto es crucial para evitar sombreados entre los propios paneles.

Existe una normativa [19] que hace referencia a esta problemática y establece:

$$h = L \operatorname{sen}(\beta) \quad (2)$$

$$d = \frac{h}{\operatorname{tg}(21^\circ)} \quad (3)$$

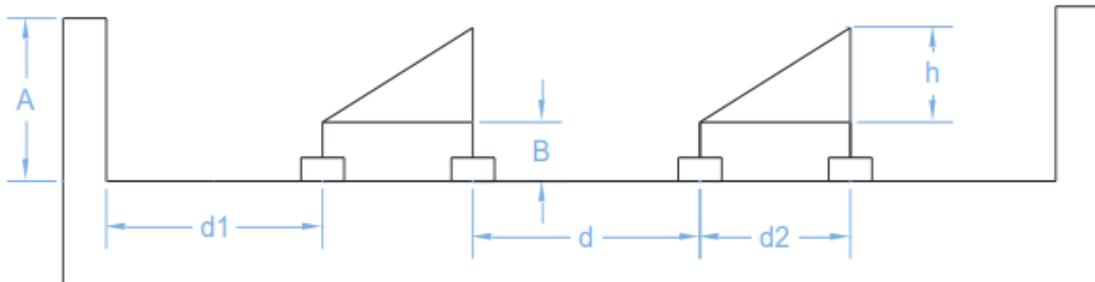


Figura 26. Criterios para distancias entre paneles y con el borde de la cubierta [19].

Donde:

- h = altura del panel
- L = longitud del panel
- A = altura borde cubierta
- B = altura soporte paneles
- $d1$ = distancia entre los paneles y borde de la cubierta
- $d2$ = distancia que ocupa el panel

Por ello, teniendo en cuenta que la longitud (L) de un panel solar medio es de 1,7 m:

$$h = 1,7 \operatorname{sen}(30) = 0,85 \text{ m} \quad (3)$$

$$d = \frac{0,85}{\operatorname{tg}(21^\circ)} = 2,2 \text{ m} \quad (4)$$

De este modo la **separación** entre las distintas **filas** de paneles será de **2,2 m** con la finalidad de evitar sombras entre las mismas.

Una vez obtenidos estos datos, se puede calcular el resto a través del Teorema de Pitágoras: **$d2 = 1,47 \text{ m}$**

Finalmente fijaríamos los siguientes valores típicos: **$B = 0,5 \text{ m}$** y **$d1 = 1 \text{ m}$** .

3.1.5 Integración con infraestructura existente

La integración efectiva de las infraestructuras de almacenamiento de hidrógeno con las ya existentes en el aeropuerto es crucial para una transición fluida hacia el uso generalizado de esta fuente de energía en la aviación.

- **Adaptabilidad a Infraestructuras Previas:**

Las áreas de almacenamiento están diseñadas para ser altamente adaptables a las infraestructuras aeroportuarias ya existentes. Se consideran factores como la ubicación estratégica, la capacidad de carga y las necesidades logísticas, garantizando una transición sin interrupciones.

- **Conexión con Redes de Distribución:**

La integración incluye una conexión eficiente con las redes de distribución existentes en el aeropuerto. Se establecen puntos de conexión estratégicos para facilitar la carga y descarga de hidrógeno, optimizando la distribución hacia las áreas de estacionamiento y puntos de recarga.

- **Actualización Gradual:**

La integración se planifica de manera gradual y escalonada, permitiendo la actualización de infraestructuras conforme avanza la adopción de hidrógeno en la aviación. Los planes consideran avances tecnológicos y cambios en la demanda, garantizando una transición eficiente y sostenible.

- **Eficiencia en el Uso de Espacios:**

Se busca maximizar la eficiencia en el uso de espacios existentes, adaptando las áreas de almacenamiento de hidrógeno a la infraestructura previa sin comprometer la operatividad. La planificación cuidadosa asegura una integración que no afecta negativamente las operaciones aeroportuarias.

- **Normativas y Seguridad:**

La integración cumple con las normativas y estándares de seguridad establecidos para la manipulación de hidrógeno. Se implementan medidas de seguridad y protocolos de respuesta ante emergencias, asegurando la protección de las infraestructuras existentes y el personal.

- **Coordinación con Operadores:**

La colaboración estrecha con los operadores y gestores del aeropuerto es fundamental. Se establecen protocolos de coordinación para garantizar una transición sin contratiempos, minimizando impactos en las operaciones cotidianas y optimizando la eficiencia global.

- **Sostenibilidad Ambiental:**

La integración considera prácticas sostenibles para fomentar la generación de hidrógeno verde y maximizar la eficiencia energética. La sostenibilidad ambiental se

incorpora como un principio rector, asegurando que la transición a hidrógeno contribuya a objetivos medioambientales a largo plazo.

La integración con las infraestructuras existentes representa un paso estratégico en la implementación exitosa del hidrógeno en la aviación, asegurando una convivencia armoniosa con las operaciones aeroportuarias y maximizando la eficiencia en el uso de recursos ya establecidos.

Si tenemos que destacar una de las infraestructuras clave dentro del aeropuerto para el transporte de hidrógeno desde los puntos de almacenamiento hasta los puntos de consumo, hablamos de los Hidroductos:

3.1.5.1 Hidroductos

En la Unión Europea, se cuenta con una extensa red de más de 2 millones de kilómetros de tuberías gasísticas y 20,000 compresores, lo que convierte a las infraestructuras existentes en atractivas para el transporte de hidrógeno. Sin embargo, esta alternativa demanda una inversión inicial considerable, por lo que resulta más recomendable para el transporte continuo y en grandes volúmenes, en lugar de situaciones esporádicas.

Cuando el hidrógeno se mezcla con gas, se denomina "**blending**".

En el ámbito de la adaptación, el **retrofitting** ha sido una estrategia salvadora para muchas empresas, consistiendo en la actualización de las instalaciones existentes para incorporar cantidades específicas de hidrógeno en una corriente de gas natural. Este enfoque implica costos significativamente menores en comparación con la creación de instalaciones desde cero.

Otra opción es el **repurposing**, que implica la conversión de un gasoducto de gas en uno diseñado para transportar hidrógeno. Aunque este proceso tiene un costo de entre el 10 % y el 35 % en comparación con la construcción de una red completamente nueva, se deben tener en cuenta factores como el estado de la tubería, la imposibilidad de convertir los compresores actuales y la posibilidad de fugas debido al tamaño más pequeño de la molécula de hidrógeno en comparación con la de metano. Además, se requiere equipar los cromatógrafos con una columna para el hidrógeno.

La elección del **diámetro** del gasoducto dependerá de diversos factores, como el tamaño del aeropuerto, la incorporación de aeronaves de hidrógeno, la longitud del conducto, la diferencia de presión y la cantidad de curvas y válvulas. En términos de eficiencia, el transporte de hidrógeno a través de gasoducto destaca como el método más efectivo para movilizar grandes volúmenes de hidrógeno gaseoso, ofreciendo la posibilidad de emplear hidrógeno puro a diversas presiones o mezclado con sistemas de gas natural a diferentes porcentajes y presiones.

Tamaño del aeropuerto	Pequeño		Medio		Grande	
Visión	Corto Plazo	Largo Plazo	Corto Plazo	Largo Plazo	Corto Plazo	Largo Plazo
Millones PAX Año	7,5	10	25	30	100	120
Media diaria H2 Líquido (M Litros)	0,1	0,7	0,5	6	1,5	20
Diámetro Gasoductos (mm)	75	150	100	300	150	450
Almacenamiento H2 Líquido (M Litros)	0,5	2,5	1,5	15	3,5	50
Espacio requeridos (m2)	3000	13000	10000	75000	20000	180000

Tabla 6. Propiedades del hidrógeno frente a combustibles convencionales [20].

Como se aprecia en la tabla 6, según el tamaño del aeropuerto en cuestión los requerimientos evolucionarán de una u otra forma para el corto y largo plazo respectivamente.

Es poco probable que la mezcla sea una opción eficaz para transportar hidrógeno a usuarios con una demanda significativa, especialmente a medida que disminuye el uso generalizado de gas natural. Cabe destacar que el transporte mediante gasoducto requiere una **inversión** de capital considerable, tanto para la construcción del nuevo gasoducto como para las instalaciones de compresión asociadas y otras infraestructuras en superficie.

Un desafío en esta área es la **reutilización** de gasoductos de alta presión de **acero** destinados al gas natural, ya que presentan propensión a la fragilización por hidrógeno, lo que podría dar lugar a fugas. Sin embargo, la reutilización de los gasoductos en sistemas de distribución de gas natural parece ser menos problemática, especialmente con la sustitución de las antiguas tuberías de fundición de hierro por polietileno (PE), lo que prepara las redes de distribución de gas para la transición al hidrógeno.

Continuando con la segmentación según el tamaño del aeropuerto, a medida que las operaciones y la flota aeroportuaria se incrementen, será necesario reemplazar progresivamente los camiones de combustible por sistemas hidrantes en los puntos de estacionamiento de las aeronaves. La siguiente propuesta se presenta como una solución adecuada:

Tamaño del Aeropuerto	2035	2040	2045	2050
Grande	Red de Hidrantes	Red de Hidrantes	Red de Hidrantes	Red de Hidrantes
Medio	Camión de comb.	Camión de comb.	Red de Hidrantes	Red de Hidrantes
Pequeño	Camión de comb.	Camión de comb.	Camión de comb.	Camión de comb.

Tabla 7. Propiedades del hidrógeno frente a combustibles convencionales (elaboración propia).

Para la instalación de hidrantes el suministro se hace a través de vehículos equipados con los equipos adecuados para bombear el hidrógeno desde la red hasta el avión.

3.1.5.2 Prototipo tuberías H2 Clipper

En la rama que abarca la distribución de hidrógeno, la compañía H2 Clipper también considera el transporte a través de **tuberías**. Concretamente se define como "**Pipe-within-a-Pipe**", que se basa en un sistema formado por una tubería en el interior de una de mayor tamaño. Esta tecnología ahorraría a las empresas y gobiernos miles de millones de capital al evitar la construcción de nuevas tuberías de hidrógeno al adaptar las existentes para este propósito.



Figura 27. Prototipo Pipe-within-a-pipe [14].

La tecnología "Safety Pipe" presenta características destacadas que la posicionan como una solución avanzada y segura para el suministro de hidrógeno. Esta innovadora tubería, compuesta por un plástico flexible, facilita su **adaptabilidad** a diferentes entornos y configuraciones. El flujo de gas inerte garantiza la seguridad operativa, eliminando riesgos asociados con posibles fugas.

Además, la tecnología incorpora sensores altamente sensibles capaces de detectar incluso las fugas más pequeñas que, aunque no representen una amenaza inmediata, son identificadas para prevenir problemas potenciales. La construcción de la tubería utiliza materiales resistentes y duraderos, como polímero reforzado con fibra o acero, asegurando la integridad estructural y la resistencia a condiciones adversas.

Un aspecto fundamental de esta tecnología es su capacidad para suministrar **hidrógeno puro** de grado para celdas de combustible. La tubería está diseñada específicamente para transportar un hidrógeno sin adulterar, crucial para aplicaciones que requieren un suministro confiable y limpio de hidrógeno, como las celdas de combustible utilizadas en diversas industrias.

En resumen, la "Safety Pipe" no solo proporciona una solución segura y eficiente, sino que también contribuye a la sostenibilidad al aprovechar las infraestructuras existentes y reducir costos asociados con la construcción de nuevas tuberías de hidrógeno.

3.1.6 Capacitación del personal

La transición de los sistemas de tratamiento de combustible de queroseno a los innovadores sistemas de hidrógeno en un aeropuerto implica no solo la implementación de nuevas tecnologías, sino también la capacitación integral del personal para garantizar una operación segura y eficiente. La introducción de este cambio revolucionario requiere una **adaptación** tanto en la **mentalidad** como en las **habilidades** del personal, lo cual se puede abordar a través de programas de capacitación bien estructurados.

En primer lugar, es esencial ofrecer **cursos específicos** que proporcionen a los trabajadores una comprensión profunda de los principios fundamentales del hidrógeno como combustible, los sistemas de almacenamiento y suministro, así como las técnicas de manejo seguro. Estos cursos pueden incluir módulos **teóricos** y **prácticos** para garantizar una comprensión integral de los nuevos procedimientos.

La seguridad ocupa un lugar central en la transición hacia el hidrógeno. Los trabajadores deben estar plenamente capacitados en los **protocolos de seguridad** asociados con el hidrógeno, incluida la manipulación segura de equipos y la gestión de posibles situaciones de emergencia. La familiaridad con los sistemas de detección de fugas y los procedimientos de evacuación también serán aspectos críticos.

La capacitación no solo debe centrarse en los aspectos técnicos, sino también en la **concienciación** sobre la sostenibilidad y los beneficios ambientales asociados con el uso del hidrógeno. La comprensión de cómo la transición contribuye a la **reducción de emisiones** y alinearse con las metas medioambientales globales puede generar un sentido de propósito y motivación entre el personal.

En conclusión, la transición a sistemas de hidrógeno en aeropuertos no solo implica una actualización tecnológica, sino también una transformación en la capacitación del personal. A través de programas educativos bien diseñados, los trabajadores pueden adquirir las habilidades y conocimientos necesarios para operar de manera eficiente en este nuevo paradigma de la aviación sostenible. La capacitación no solo impulsa la seguridad y la eficiencia, sino que también empodera al personal para ser agentes activos en la construcción de un futuro aeroportuario más sostenible.

3.1.7 Coordinación con aerolíneas y fabricantes

La efectiva integración del hidrógeno en la aviación demanda una **colaboración estrecha** entre aeropuertos, aerolíneas y fabricantes, aspecto clave para asegurar una transición sin contratiempos. La coordinación se concentra en diversos puntos fundamentales que garantizan una implementación exitosa.

En primer lugar, la creación de **infraestructuras conjuntas** se erige como un pilar esencial, con aerolíneas y fabricantes colaborando en el diseño de **sistemas** de suministro y estaciones de recarga **acordes** con las especificaciones técnicas de las **aeronaves** de hidrógeno. Además, la adaptación de flotas y tecnología implica una estrecha colaboración entre fabricantes y aerolíneas, buscando eficiencia en la propulsión de hidrógeno.

El establecimiento de **estándares y normativas comunes** es otro punto crucial, donde aerolíneas, fabricantes y aeropuertos trabajan de la mano para garantizar la interoperabilidad y seguridad en todas las fases operativas. Los programas de entrenamiento del personal aéreo, abarcando desde pilotos hasta técnicos de mantenimiento, son esenciales para familiarizarlos con los nuevos sistemas y protocolos de seguridad.

La coordinación se extiende a la **planificación de rutas y operaciones**, considerando las características específicas de las aeronaves de hidrógeno. La identificación de rutas viables, la optimización de tiempos de recarga y la planificación de escalas estratégicas son pasos clave. La investigación y desarrollo conjunto también desempeñan un papel importante, ya que fabricantes y aerolíneas participan en proyectos que buscan mejorar la eficiencia, seguridad y sostenibilidad de la propulsión de hidrógeno.

La comunicación y divulgación son elementos cruciales para construir confianza y comprensión del nuevo paradigma entre pasajeros, tripulación y personal aeroportuario. La coordinación efectiva entre todas las partes involucradas es la piedra angular para una transición exitosa hacia la aviación impulsada por hidrógeno, fomentando la sostenibilidad y eficiencia en toda la industria aeroportuaria.

3.1.8 Desarrollo de normativa y estándares

El desarrollo de normas y estándares para la aviación con hidrógeno es un componente crítico para garantizar la seguridad, eficiencia y sostenibilidad de esta nueva frontera tecnológica. En el ámbito de la seguridad, se establecen estándares específicos que abordan aspectos cruciales como el almacenamiento y manipulación de hidrógeno, así como protocolos de emergencia para mitigar riesgos potenciales.

Además, las normativas referentes a la infraestructura, incluyendo estaciones de recarga y áreas de almacenamiento, buscan la uniformidad en su diseño y operación. Estos estándares son fundamentales para establecer requisitos claros en la implementación de infraestructuras asociadas al suministro de hidrógeno a aeronaves, asegurando prácticas seguras y eficientes.

En el ámbito de las aeronaves, se definen normativas para la certificación, abordando requisitos técnicos, de seguridad y medioambientales. Este enfoque busca garantizar que las aeronaves cumplan con estándares de la industria y normativas gubernamentales, impulsando la aceptación regulatoria.

Adicionalmente, se establecen protocolos de operación que ofrecen directrices a aerolíneas y operadores para la integración y operación cotidiana de aeronaves propulsadas por hidrógeno, abordando aspectos operativos, de mantenimiento y logísticos.

En el ámbito medioambiental, se imponen estándares para medir y limitar las emisiones de las aeronaves de hidrógeno, contribuyendo al compromiso de la industria con la sostenibilidad y la reducción de la huella ambiental de la aviación. La estandarización de tecnologías asociadas, como sistemas de almacenamiento y celdas de combustible, facilita la interoperabilidad y la adopción generalizada, promoviendo la innovación y proporcionando un marco coherente para la implementación global de tecnologías clave en la aviación con hidrógeno. La alineación con normativas internacionales es clave para asegurar consistencia global y facilitar la operación de estas aeronaves en diferentes regiones y mercados. En conjunto, estas normativas y estándares son esenciales para crear un entorno regulado y seguro que propicie el desarrollo sostenible de la aviación con hidrógeno a nivel mundial.

3.1.9 Monitorización y mantenimiento

La monitorización y el mantenimiento son elementos críticos en la implementación de infraestructuras y aeronaves con hidrógeno. En el contexto de las infraestructuras, la supervisión constante de parámetros como presión, temperatura y fugas en estaciones de recarga y áreas de almacenamiento garantiza un suministro de hidrógeno seguro y eficiente. Esta monitorización permite detectar cualquier anomalía de manera temprana, asegurando la integridad del sistema y minimizando riesgos.

- **En el caso de las tuberías y conducciones:**

La monitorización se centra en la integridad estructural y la detección temprana de problemas como fugas o corrosión. Se establecen programas de mantenimiento preventivo para asegurar el buen estado y funcionamiento continuo de estas infraestructuras críticas. La implementación de tecnologías de monitoreo avanzado proporciona datos en tiempo real, permitiendo intervenciones proactivas y reduciendo el riesgo de fallos inesperados.

- **Respecto a las áreas de almacenamiento:**

La monitorización se concentra en la temperatura y presión del hidrógeno almacenado para detectar y abordar cualquier variación que pueda indicar problemas de seguridad o pérdida de eficiencia. Un enfoque proactivo en la monitorización garantiza condiciones óptimas de almacenamiento y contribuye a la seguridad operativa.

- **En cuanto a las aeronaves propulsadas por hidrógeno:**

La monitorización abarca desde el rendimiento de las celdas de combustible hasta la eficiencia del sistema de almacenamiento de hidrógeno a bordo. Sistemas de diagnóstico avanzado identifican fallos o desviaciones en tiempo real, facilitando intervenciones de mantenimiento predictivo y evitando paradas no programadas. Este enfoque proactivo en la monitorización y mantenimiento asegura la operación segura y eficiente de las aeronaves de hidrógeno.

- **En términos de mantenimiento:**

Elaboración de programas periódicos para inspecciones detalladas y sustitución de componentes desgastados. El mantenimiento proactivo, basado en datos de monitorización, contribuye a reducir costos operativos y maximizar la disponibilidad de las aeronaves. La identificación temprana de posibles problemas permite planificar intervenciones de manera eficiente, minimizando el tiempo de inactividad y garantizando la fiabilidad de las operaciones aéreas impulsadas por hidrógeno.

3.1.10 Proyectos piloto y ejemplos prácticos

La introducción de proyectos piloto para la implementación de infraestructuras de hidrógeno en aeropuertos puede desempeñar un papel crucial en la adopción gradual de estas tecnologías. A continuación, se definen algunos ejemplos existentes.

- **Proyecto Piloto de AERTEC Solutions en Colaboración con Aeropuertos Europeos [21]:**

AERTEC Solutions, reconocida por su liderazgo en ingeniería aeroportuaria, ha impulsado proyectos piloto junto a aeropuertos europeos en el ámbito de desarrollos de infraestructuras de hidrógeno en la aviación. El proyecto, que tiene una duración de tres años, tiene como objetivo investigar y **desarrollar las tecnologías** necesarias para la producción, almacenamiento y distribución del hidrógeno para su uso en la aviación. El proyecto se llevará a cabo en colaboración con los siguientes aeropuertos:

- Aeropuerto de **Madrid-Barajas**.
- Aeropuerto de **Barcelona-El Prat**.
- Aeropuerto de **Frankfurt**.
- Aeropuerto de **Ámsterdam-Schiphol**.

El objetivo principal es basar el proyecto en los siguientes aspectos:

- **Producción de hidrógeno verde.**
- **Almacenamiento de hidrógeno.**
- **Distribución de hidrógeno.**
- **Evaluación de las tecnologías de hidrógeno para la aviación.**

Además de los aspectos comentados, en la investigación se tendrán también en cuenta cuestiones como la **seguridad** del uso del hidrógeno en la aviación, los **costes** asociados a la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno, y la aceptación de esta nueva tecnología por parte de los pasajeros y las aerolíneas.

- **Proyecto Piloto en los aeropuertos alemanes de la empresa H2 Mobility [22]:**

La empresa H2 Mobility ha anunciado un proyecto piloto para introducir el **hidrógeno verde** en las operaciones de **handling** de diferentes aeropuertos alemanes. Este proyecto, que tiene una duración de 2 años, tiene como objetivo evaluar la viabilidad de utilizar el hidrógeno verde para alimentar a los vehículos handling del aeropuerto.

Este proyecto se centrará en el uso del hidrógeno para alimentar los siguientes vehículos de handling:

- Camiones de transporte de equipaje.
- Camiones de combustible.
- Camiones de limpieza.

El aeropuerto espera que el uso del hidrógeno verde pueda ayudar a **reducir las emisiones** de gases de efecto invernadero en sus operaciones de handling en torno al **20-25 %** para el corto plazo.

- **Colaboración del Aeropuerto de Heathrow con Airbus [23]:**

Airbus y el aeropuerto de Heathrow, entre otros de Reino Unido, han anunciado una colaboración para avanzar en la sostenibilidad del sector de la aviación, implementando hidrógeno en las **operaciones en tierra** y eventualmente en la propulsión de **aeronaves**.

El acuerdo, que tendrá una duración de 5 años, tiene como objetivo desarrollar un plan para la introducción del hidrógeno en Heathrow, que es el aeropuerto más grande del Reino Unido. El plan incluirá la **evaluación** de la **infraestructura** necesaria para el suministro y el uso de hidrógeno, así como la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías para la aplicación del hidrógeno en las operaciones de tierra y la propulsión de aeronaves. Los objetivos principales en los que se sustenta esta colaboración son:

- **Reducir las emisiones** de gases de efecto invernadero en un 15% para el año 2030.
- Desarrollar un plan para la **introducción del hidrógeno** en Heathrow.
- Investigar y desarrollar nuevas tecnologías para la aplicación del hidrógeno en las operaciones en tierra y propulsión de aeronaves.

El hidrógeno puede utilizarse en las operaciones en tierra para alimentar vehículos como los autobuses de transporte de pasajeros, los vehículos de limpieza, de mantenimiento, de handling, etc. El hidrógeno es una fuente fundamental de energía limpia y eficiente, y su uso en las operaciones de tierra puede ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al aeropuerto.

Para el caso de la integración del hidrógeno en la propulsión de aeronaves, estos aviones propulsados son más silenciosos y eficientes que los aviones propulsados por combustibles fósiles. Además, el hidrógeno no produce emisiones de gases de efecto invernadero, lo que los convierte en una opción más sostenible para la aviación.

Esta colaboración entre Airbus y el Aeropuerto de Heathrow es un paso importante para avanzar en la sostenibilidad de la aviación. El acuerdo demuestra el compromiso de las dos empresas con el desarrollo de nuevas tecnologías que pueden ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en la aviación.

También es importante porque puede ayudar a **establecer las bases** para la introducción de esta nueva tecnología, de forma que, si este plan es exitoso podría servir como modelo para otros aeropuertos y empresas de la industria aeronáutica.

Estos ejemplos concretos de proyectos piloto demuestran el compromiso de la industria aeroportuaria y de la aviación en general hacia la adopción progresiva de tecnologías basadas en hidrógeno, sentando las bases para una transición exitosa hacia un futuro más sostenible.

3.2 Hidrógeno en aeronaves

3.2.1 Propulsión con motores de hidrógeno

La adopción de motores de hidrógeno y celdas de combustible en aeronaves representa un paso crucial hacia una aviación más sostenible y eficiente. Los motores de hidrógeno ofrecen una alternativa limpia y de bajo impacto ambiental en comparación con los motores tradicionales de combustibles fósiles.

Los motores de hidrógeno funcionan mediante la combustión de hidrógeno gaseoso o líquido en presencia de oxígeno, generando así energía para impulsar la aeronave. Este proceso de combustión produce como únicos subproductos vapor de agua y calor, eliminando las emisiones de gases contaminantes y contribuyendo a la reducción de la huella de carbono de la aviación.

Además de los motores de hidrógeno, las celdas de combustible son otra tecnología clave en la propulsión aérea basada en hidrógeno. Las celdas de combustible convierten directamente la energía química del hidrógeno en electricidad, que luego alimenta los motores eléctricos de la aeronave. Este enfoque proporciona una eficiencia energética significativamente mayor en comparación con los motores de combustión interna tradicionales.

La ventaja distintiva de los motores de hidrógeno y las celdas de combustible es su capacidad para ofrecer un rendimiento respetuoso con el medio ambiente y reducir drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero. A medida que la tecnología continúa evolucionando y enfrentando desafíos relacionados con el almacenamiento y la infraestructura, se vislumbra un futuro en el que estas innovaciones transformen la industria de la aviación hacia un modelo más sostenible y limpio.

3.2.1.1 Combustión de hidrógeno en motores térmicos

El proceso de operación de un motor propulsado por queroseno en aviones convencionales, con algunas adaptaciones, guarda una notable similitud con aquellos impulsados por hidrógeno. Fundamentalmente, involucra la **inyección** del combustible **seguida** por la **combustión** en la cámara correspondiente, generando elevadas temperaturas y presiones que impulsan la aeronave. En consecuencia, se abordará a continuación tanto el funcionamiento básico como las modificaciones requeridas para adecuar estos motores al uso de hidrógeno.

- **Motores de hidrógeno.**

Los términos "**Turbofán**" y "**Turboprop**" se utilizan para describir los dos tipos **más comunes** de motores en aeronaves comerciales en la actualidad. Aunque difieren significativamente en la entrega de potencia, eficiencia y consumo, comparten similitudes fundamentales en su funcionamiento, ya que ambos son motores de turbina de gas.

Por lo tanto, el concepto del proyecto de hidrógeno puede aplicarse tanto a los motores Turbofán como a los Turboprop. En ambos casos, el **combustible**, en estado **gaseoso**, es introducido mediante inyectores **dentro** de la **cámara** de combustión.

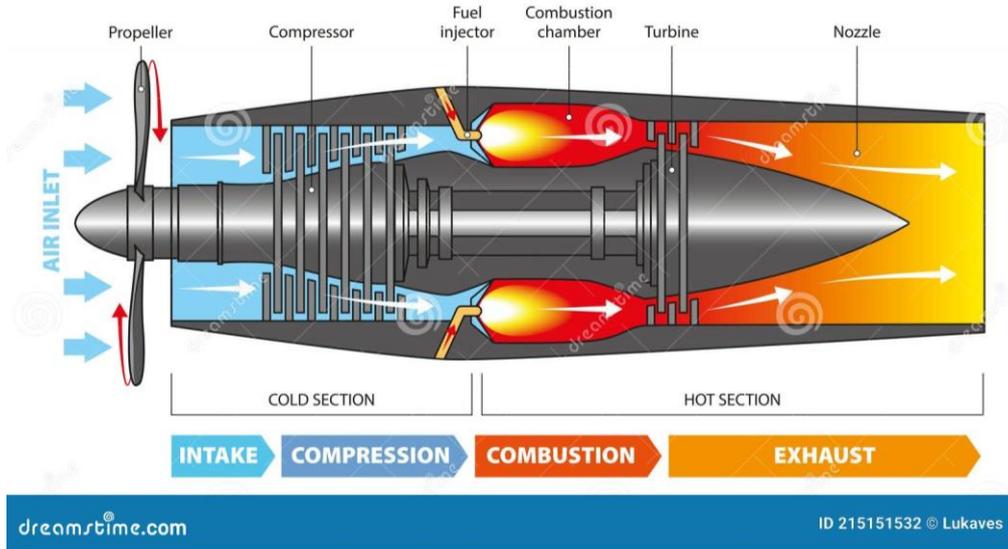


Figura 28. Sección detallada de un motor Turboprop [24].

El aire caliente y comprimido, resultante de la combustión, impulsa la turbina que, a través de un eje, transmite su movimiento a la hélice. En este caso particular, a diferencia del Turboprop, donde el eje acciona el fan o ventilador ubicado en la parte frontal del motor, la hélice se ve impulsada directamente.

Una de las principales ventajas del hidrógeno radica en su elevado poder calorífico como ya se mostró con anterioridad, alcanzando unas 2,5 veces el poder calorífico del queroseno. Esto significa que, manteniendo todos los demás factores estables, una aeronave alimentada con hidrógeno requerirá 2,5 veces menos combustible en comparación con el queroseno.

Otro factor clave en el diseño de aeronaves de hidrógeno al igual que en las actuales debe de ser la eficiencia, de forma que se debe tener en cuenta la ruta a seguir, la carga útil y las necesidades específicas de la aerolínea, lo que determinará la elección entre Turboprop y los dos tipos de Turboprop de alta y baja derivación, como se evalúa en el siguiente diagrama.

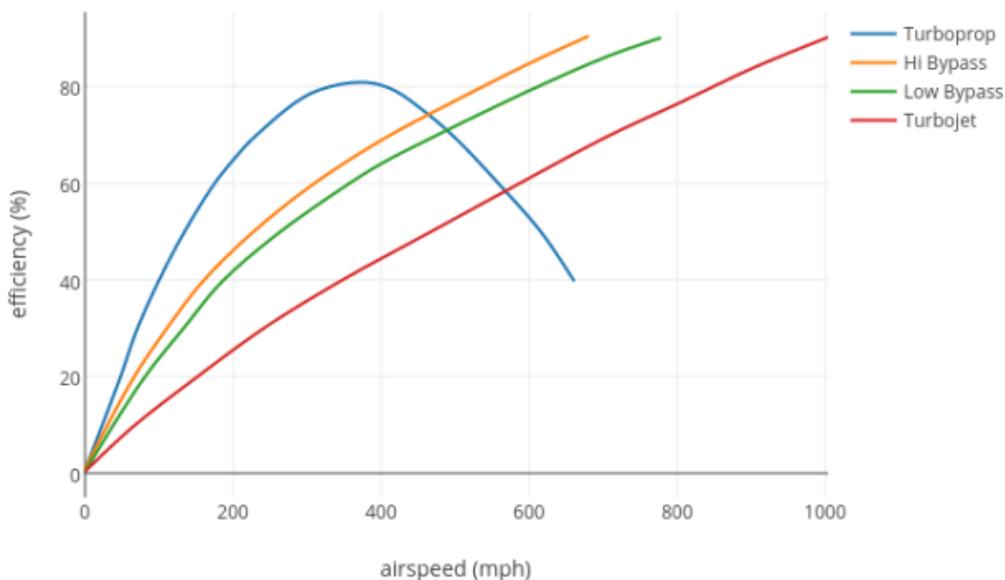


Figura 29. Comparación de rendimiento propulsivo para varias plantas propulsora [25].

Como se puede apreciar en la figura 28, si queremos alcanzar el óptimo habrá que fijarse en la velocidad a la que vuela nuestra aeronave, de modo que será más eficiente el uso de un tipo u otro de planta propulsora.

De esta manera, en viajes regionales se suelen utilizar aeronaves equipadas con motores Turboprop (ATR), y en viajes de mayor recorrido se utilizan turbofanés de alta relación de derivación (A350).



Figura 30. Imágenes ATR vs A350 [26].

En la actualidad también están presentes el “Turbojet” y “Propfan”, siendo este último una puerta hacia el futuro de una aviación más sostenible. Deriva del “Turboprop”, el cual se ha mencionado con anterioridad.

En cuanto al **Turbojet**, es el principal actor en la **aviación militar**, impulsando a los aviones de combate que generalmente alcanzan velocidades **supersónicas** y priorizan esta cualidad, por lo que la necesidad de implementación del hidrógeno por motivos ambientales es menor que en el caso de la aviación civil.

Los motores en aeronaves impulsadas por hidrógeno exhiben una eficiencia notable gracias a la alta capacidad calorífica específica del hidrógeno y su baja temperatura de almacenamiento. La capacidad del hidrógeno almacenado criogénicamente para disipar calor podría potenciar el rendimiento del motor.

Para aeronaves subsónicas, teóricamente, la **resistencia** podría **reducirse** mediante el enfriamiento de la superficie del **fuselaje** con **hidrógeno**, manteniendo un flujo laminar constante y minimizando la resistencia. La baja densidad del hidrógeno implica que se necesita alrededor de cuatro veces más volumen que combustibles convencionales como el queroseno o sus equivalentes.

A pesar de las cualidades prometedoras del hidrógeno como combustible sostenible, la ingeniería aeronáutica enfrenta desafíos sustanciales. El **almacenamiento** en forma **líquida** se destaca como un desafío inicial, buscando maximizar la densidad y, por ende, la autonomía de la aeronave.

Posteriormente, el hidrógeno se impulsa por una bomba hacia un intercambiador de calor, interactuando con otros fluidos como el aceite, calentándolos y transformándolos a estado gaseoso. Este proceso, que involucra inyectores para acceder a la cámara de combustión, presenta desafíos técnicos cruciales que requieren atención en el desarrollo de aeronaves propulsadas por hidrógeno [27].

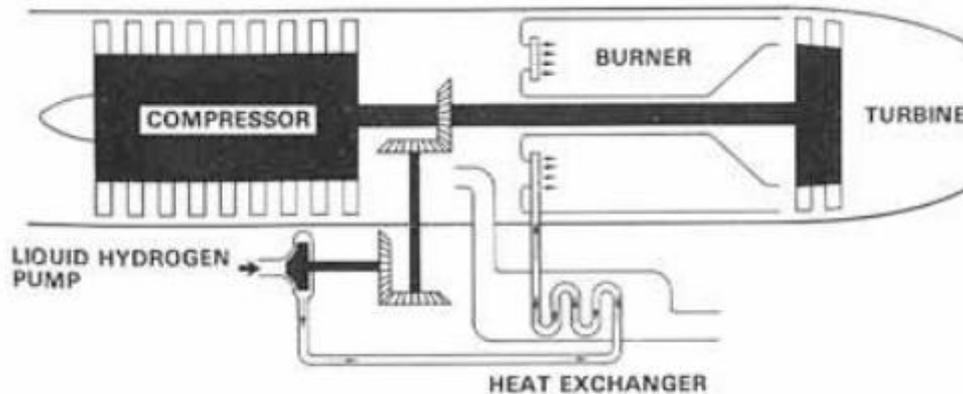


Figura 31. Esquema del ciclo del hidrógeno desde el tanque (líquido) hasta la combustión [27].

Debido a la naturaleza criogénica del hidrógeno líquido, los **tanques** de almacenamiento deben diseñarse considerando una **baja relación superficie-volumen** para limitar la evaporación y reducir tanto el peso del tanque como el del aislamiento.

Este tipo de almacenamiento, al ser voluminoso y de baja densidad, generalmente resulta en una relación sustentación-resistencia ligeramente menor en comparación con las aeronaves que utilizan combustibles convencionales.

La entrada mínima inevitable de calor en el tanque y sus implicaciones en la fijación del tanque y la estructura de soporte plantean desafíos no beneficiosos. Se debe tener en cuenta la expansión y contracción térmica tanto del tanque como de la estructura. El sistema de aislamiento criogénico, por sí solo, no presenta problemas, pero se enfrenta a desafíos relacionados con la vida útil requerida, la necesidad de absorber impactos y el requisito de accesibilidad. Dado que el tanque será más pesado y voluminoso que los tanques de queroseno, se sacrifica parte de la ventaja de peso derivada del alto calor de combustión.

En el proceso de **combustión** de hidrógeno, la **ausencia** de **dióxido** de carbono y el **aumento** de **vapor** de agua abajo de la cámara de combustión son características notables. Debido al alto calor específico del vapor de agua, se incrementa el calor específico de los gases de combustión de hidrógeno en comparación con los gases equivalentes de la combustión de hidrocarburos. Esta modificación en la expansión de la turbina resulta en un **beneficio** de **consumo** de combustible específico de energía para el hidrógeno del orden del 3%.

Además de este efecto de composición, el rendimiento de los motores alimentados con hidrógeno puede mejorarse mediante el uso del ciclo no convencional, **aprovechando** la capacidad de **refrigeración** del hidrógeno líquido criogénico.

Aunque varios de estos ciclos no convencionales han ganado atención para el combustible de queroseno, la disponibilidad de hidrógeno es beneficiosa. Su alto poder de disipación de calor reduce las demandas sobre la eficiencia del intercambiador de calor, lo que permite reducir el tamaño y la masa del intercambiador.

Una estrategia para aprovechar las peculiaridades del hidrógeno implica enfriar el aire del compresor, reduciendo así el trabajo del compresor. Esto, en combinación con una relación de presión general más alta, podría conducir a una mayor eficiencia, ya que se puede adoptar una relación de derivación más alta gracias a la disponibilidad de una presión más alta en la entrada de la turbina de baja presión.

Sin embargo, se presenta el desafío de la congelación de la humedad en el aire, lo que podría obstruir los conductos del intercambiador de calor y privar al motor de aire.

Dado que el hidrógeno se almacena a una extremadamente baja temperatura de -252°C , existe la posibilidad de inyectarlo a temperaturas significativamente inferiores a la temperatura de referencia de su poder calorífico.

No obstante, hay un límite inferior en la temperatura de inyección establecido por el controlador de combustible, que debe ser superior a -123°C , asegurando así el suministro al intercambiador de calor. Este límite también previene viscosidades en el inyector, facilitando la entrada del hidrógeno.

En cualquier caso, el hidrógeno debe bombearse desde el tanque a una presión de inyección adecuada mediante una bomba de refuerzo integrada en el tanque y una bomba montada en el motor que eleva su temperatura.

Es probable que el combustible pase a través de un enfriador de aceite y un intercambiador de calor para reducir la temperatura del aire utilizado en la presurización de la cabina. Todo este proceso elevará la temperatura del hidrógeno desde alrededor de -252°C a cerca del límite mínimo de -123°C .

A continuación, se puede apreciar el proceso por el que pasaría el hidrógeno, desde el tanque hasta ser combustionado en la cámara de combustión:

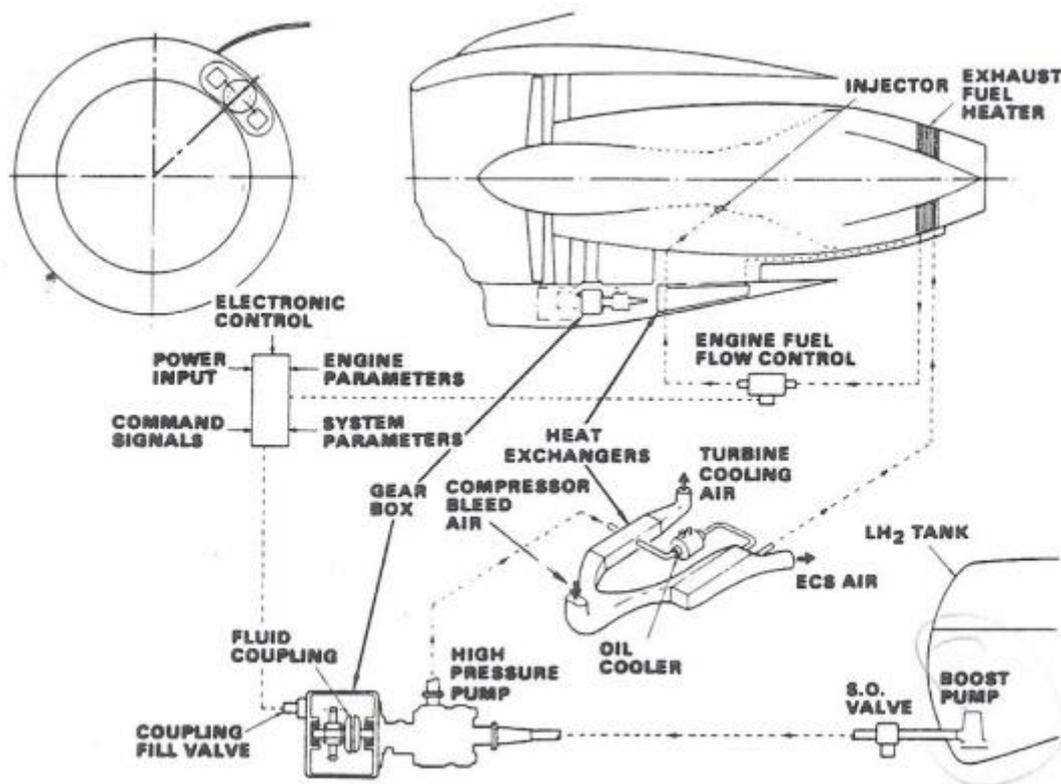


Figura 32. Ciclo del hidrógeno en aeronave [28].

En el contexto de estos ciclos no convencionales, se busca lograr una temperatura de inyección en la cámara de combustión de hasta 350°C mediante la implementación estratégica de intercambiadores de calor para optimizar el rendimiento del motor. La propia cámara de combustión experimenta modificaciones en estos motores.

Dada la velocidad de la **llama del hidrógeno**, que es varias veces mayor que la del queroseno como ya se mostró en la figura 4, la **longitud** de la **cámara** de combustión puede **reducirse** significativamente para **disminuir** las emisiones de **NOx** a niveles considerablemente inferiores en comparación con las cámaras de combustión de queroseno.

Los **niveles** de **NOx** están directamente **relacionados** con el tiempo de **residencia** del hidrógeno en la **cámara** de combustión y aumentan de manera exponencial con la temperatura de la llama. Debido al límite de inflamabilidad más alto del hidrógeno en comparación con el queroseno en la cámara de combustión, las emisiones de NOx son más bajas incluso con un tiempo de residencia más prolongado.

En resumen, las modificaciones más significativas en el motor abarcan todo el sistema de conducción del hidrógeno hasta los inyectores y bombas, los intercambiadores de calor, e incluso la posibilidad de reemplazar compresores debido al sistema de refrigeración proporcionado por el combustible.

3.2.2 Diseño optimizado de aeronaves

La incorporación de tecnologías basadas en hidrógeno en la aviación también implica un cambio significativo en el diseño de las aeronaves, con un enfoque en la redistribución del peso y la optimización aerodinámica para aprovechar al máximo las ventajas de esta nueva forma de propulsión.

En términos de **redistribución de peso**, los sistemas de almacenamiento y suministro de hidrógeno deben integrarse de manera eficiente en la estructura de la aeronave. Dado que el hidrógeno es más ligero que los combustibles tradicionales, esto puede influir en la disposición general de los componentes y la estructura de la aeronave. La ubicación estratégica de los tanques de hidrógeno y otros equipos asociados se convierte en un aspecto crucial del diseño, buscando mantener un **equilibrio** adecuado y optimizar la eficiencia del vuelo.

La optimización aerodinámica también desempeña un papel clave en el diseño de aeronaves propulsadas por hidrógeno. El principal esfuerzo se centra en minimizar la resistencia aerodinámica, aprovechando al máximo la eficiencia inherente de los motores de hidrógeno y mejorando la aerodinámica general de la aeronave. Esto puede implicar la introducción de formas más aerodinámicas, cambios en la disposición de las alas y otras características que reduzcan la resistencia al avance y mejoren la eficiencia del combustible.

En conjunto, estos ajustes de diseño buscan crear aeronaves que no solo aprovechen al máximo las ventajas ambientales del hidrógeno, sino que también maximicen la eficiencia operativa y el rendimiento general en vuelo. Con la evolución continua de la tecnología y la investigación en la aviación basada en hidrógeno, se espera que los diseños futuros logren una armonía aún mayor entre la eficiencia energética y la sostenibilidad.

Ya existen actualmente ideas de **prototipos** y conceptos **futuristas** de los nuevos tipos de aeronaves que podemos encontrar en un futuro no tan lejano. Varios fabricantes líderes están desarrollando proyectos ambiciosos que podrían transformar la forma en que concebimos los vuelos.

Un ejemplo destacado es el proyecto "**ZEROe**" de **Airbus**, que busca desarrollar una serie de aviones con propulsión a base de hidrógeno. Los conceptos incluyen una aeronave de ala mixta con propulsión líquida de hidrógeno, lo que representa un paso significativo hacia vuelos de emisiones cero. Airbus está explorando diversas configuraciones y tecnologías para llevar a cabo esta visión futurista.

Otro proyecto es el "**H2Clipper**", un dirigible de carga propulsado por celdas de combustible de hidrógeno. Este concepto futurista busca aprovechar las ventajas del hidrógeno en términos de eficiencia energética y bajas emisiones para la movilidad aérea de gran capacidad y carga.

Boeing, por su parte, está trabajando en el "**EcoDemonstrator**" que, aunque no está específicamente centrado en hidrógeno, sirve como plataforma para probar y evaluar nuevas tecnologías, incluidas aquellas relacionadas con combustibles sostenibles, lo que podría incluir el hidrógeno en futuras iteraciones.

Estos prototipos y conceptos futuristas subrayan el compromiso de la industria aeroespacial con la exploración de soluciones avanzadas y sostenibles. A medida que estos proyectos evolucionan, podríamos ver avances significativos en la implementación práctica de tecnologías de hidrógeno en la aviación, abriendo la puerta a un futuro más limpio y eficiente en el transporte aéreo.

3.2.2.1 Proyecto ZEROe

El proyecto ZEROe de Airbus consiste en una iniciativa ambiciosa que busca desarrollar una serie de aviones comerciales con tecnología de propulsión a base de hidrógeno, con el objetivo de lograr vuelos de emisiones cero. Airbus ha presentado varios conceptos dentro de este proyecto explorando diferentes configuraciones y soluciones de tecnologías que puedan aprovechar el potencial del hidrógeno como fuente de energía limpia. Son tres principales conceptos propuestos bajo el paraguas de “ZEROe”

Este concepto presenta un diseño de avión de pasajeros con una configuración de turbofán propulsado por hidrógeno líquido. Airbus busca demostrar la viabilidad técnica y económica de este enfoque para vuelos de larga distancia (alcance mayor a 2.000 millas náuticas). Los aparatos serían capaces de realizar operaciones transcontinentales y estarían propulsados por dos motores de turbina de gas modificado que funcionarían por combustión de hidrógeno. El hidrógeno líquido se almacenaría en tanques criogénicos y se ubicaría en la parte trasera.



Figura 33. Concepto Turbofán ZEROe por Airbus [29].

La idea de **ala mixta** considera una aeronave de cuerpo ancho que utiliza hidrógeno líquido como combustible para alimentar motores de turbina de gas modificados esta configuración trata de maximizar la eficiencia y reducir las emisiones.

Pese a lo que pueda parecer por su peculiar forma, presentaría un **interior** excepcionalmente **amplio** que permitiría albergar hasta 200 pasajeros, con muchas configuraciones de distribución y almacenamiento de hidrógeno.



Figura 34. Concepto Ala Mixta ZEROe por Airbus [29].

Airbus también ha propuesto un avión **regional** de **turbohélice** con capacidad para hasta unos 100 pasajeros, impulsado por una combinación de motores de hidrógeno y motores convencionales de turbopropulsión, con dos hélices de seis palas. En este caso se enfocaría a **corta y media** distancia por su eficiencia en estos casos. Cabe destacar en este caso la eficiencia de estos motores en este rango de distancias frente a los turbofanos o turbinas convencionales.



Figura 35. Concepto Turbohélice ZEROe por Airbus [29].

En todos los conceptos se deben tener en cuenta la distribución de pesos, para poder conseguir estabilidad durante las operaciones.

Es importante destacar que estos conceptos representan visiones a largo plazo y aún están en las etapas iniciales de desarrollo. Airbus ha expresado su compromiso de trabajar en estrecha colaboración con socios de la industria y reguladores para superar los desafíos tecnológicos, regulatorios y de infraestructura asociados con la adopción de la propulsión a base de hidrógeno.

Con el objetivo de lanzar la primera aeronave propulsada por hidrógeno, ya se ha planeado un programa que haría uso de un nuevo modelo del avión A380, llamado A380 MSN1. Esta nueva aeronave serviría para testear las nuevas tecnologías que hemos venido comentando con anterioridad.

“El **A380 MSN1** es un **laboratorio** volante para las nuevas tecnologías de hidrógeno”, según el ingeniero Mathias Andriamisaina. [29]



Figura 36. Concepto A380 MSN1 para testear tecnologías de hidrógeno [29].

3.2.2.2 Proyecto H2 Clipper

Este proyecto pertenece a la empresa H2Clipper, que basa sus ideas en el aprovechamiento del hidrógeno como fuente de energía para **distribuir carga e hidrógeno** a través de un **dirigible**. Además, también ha lanzado las ideas de “Safety Pipe Technology” y de “Hydrogen Depot” que ya se han definido con anterioridad.

En cuanto al proyecto del **dirigible**, la idea trata de crear un medio de transporte que sea capaz de almacenar tanto carga de pago como hidrógeno para su distribución a lo largo de todo el mundo.

En términos de rentabilidad, se prevé que puede llegar a ser un **70% más barato** que la **carga** aérea tradicional. En cuanto a carga, se podría transportar el doble de lo que se suele transportar actualmente (unos 150.000 kg), y con una capacidad de volumen 10 veces superior (equivalente a unos 35 contenedores de carga) [14].

Por último, en comparación con la carga marítima, de carretera o ferroviaria, este medio sería entre 5 y 10 veces más rápido (**240 km/h**).

El **rango** de distancia alcanzaría prácticamente los **10.000 km**, con un coste de alrededor de 0.32\$ tonelada/milla. Se espera que en 2026 pueda realizarse el primer vuelo del prototipo, empezando a operar en 2029.



Figura 37. Prototipo del dirigible de transporte de carga e hidrógeno [14].

3.2.2.3 Proyecto ECODemonstrator

En este ámbito, **Boeing** realiza pruebas en aeronaves comerciales existentes, introduciendo nuevas tecnologías y soluciones para evaluar su desempeño en condiciones de vuelo reales. Estas tecnologías abarcan una variedad de áreas, como eficiencia de combustible, reducción de ruido, sostenibilidad y seguridad.

Boeing ha utilizado diferentes aviones como plataformas para el programa EcoDemonstrator, incluidos modelos como el Boeing **737** y el **777**. Los resultados y aprendizajes de estas pruebas pueden influir en el desarrollo futuro de aeronaves y en la adopción de tecnologías más sostenibles en la industria de la aviación.

El programa ECODemonstrator ha anunciado novedades para su undécimo año de pruebas, con la adición de aviones "Explorer" para realizar pruebas a corto plazo en proyectos específicos que contribuyan al objetivo de la industria de lograr emisiones netas de carbono cero para 2050.

Además de continuar las pruebas en el 777-200ER, el programa ahora se expandirá a la eficiencia operativa con el ECODemonstrator Explorer, comenzando con un 787-10 Dreamliner que participará en pruebas coordinadas por cuatro países.



Figura 38. Prototipo 787-10 Dreamliner [30].

Este nuevo enfoque permitirá pruebas más flexibles en múltiples plataformas en entornos operativos. El 777, que ya fue utilizado como banco de pruebas el año pasado, continuará volando con la mayor proporción posible de combustible de aviación sostenible (SAF) localmente aprobado y probará 19 nuevas tecnologías.

Algunas de estas incluyen paneles de fibra de carbono reciclada en la bodega de carga, un sistema indicador de cantidad de combustible de fibra óptica compatible con combustibles 100% sostenibles y una aplicación electrónica de bolsa de vuelo con mapas inteligentes de aeropuertos.

El primer Explorer realizará vuelos de prueba en junio, destacando la coordinación de la navegación en varias regiones para reducir el consumo de combustible y las emisiones hasta en un 10%. Boeing, en colaboración con proveedores de servicios de navegación aérea en EE. UU., Japón, Singapur y Tailandia, secuencia rutas teniendo en cuenta factores como el clima y el tráfico aéreo para lograr la máxima eficiencia del avión.

3.2.3 Innovación en materiales

La aviación propulsada por hidrógeno es una de las áreas de investigación más prometedoras en el sector aeroespacial. Sin embargo, existen algunos desafíos que deben de superarse para que esta “nueva aviación” sea viable. Uno de los desafíos más retadores es el peso de las aeronaves propulsadas por este nuevo combustible. Los **tanques** de hidrógeno, las **pilas** de combustible y otros **sistemas** necesarios para propulsar un avión con hidrógeno son más **pesados** que los sistemas tradicionales de combustible fósil.

Para **superar** este desafío, se están explorando nuevos **materiales ligeros y resistentes** que puedan ser utilizados en la fabricación de aeronaves propulsadas por hidrógeno. Estos materiales podrían ayudar a reducir el peso de las aeronaves y mejorar su eficiencia y autonomía.

Los materiales ligeros y resistentes que se estudian para formar parte de esta transición son principalmente:

- **Compuestos de fibra de carbono:**

Los compuestos de fibra de carbono son materiales muy ligeros y fuertes que ya se utilizan actualmente en la fabricación de aviones. La investigación está tratando de desarrollar nuevos compuestos que sean todavía más ligeros y resistentes ante los esfuerzos que genera el transporte y almacenamiento de hidrógeno.

- **Metales ligeros:**

Los metales ligeros como el aluminio y el titanio son muy atractivos para el diseño de estos sistemas. Se trabaja principalmente en el desarrollo de nuevos procesos de fabricación en los que se obtengan metales ligeros más eficientes y asequibles.

- **Materiales compuestos:**

Al combinar diferentes tipos de materiales, como los compuestos de fibra de carbono y metales ligeros, se consiguen propiedades idóneas para el tratamiento del hidrógeno.

Además de estos materiales, se están explorando **nuevos procesos de fabricación** para crear aeronaves propulsadas por hidrógeno más ligeras. Estos procesos podrían ayudar a reducir el desperdicio de material y mejorar la eficiencia de la fabricación.

3.2.4 Integración de tecnologías híbridas

La integración de tecnologías híbridas, combinando motores de **hidrógeno** con sistemas **eléctricos**, representa una vanguardia innovadora en el diseño de aeronaves. Estos sistemas híbridos buscan capitalizar las fortalezas de ambas tecnologías para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en la aviación.

En este enfoque, los motores de hidrógeno pueden trabajar en conjunto con tecnologías eléctricas, como sistemas de propulsión eléctrica distribuida o propulsores eléctricos de empuje adicional. Estos sistemas híbridos permiten una **gestión** más **flexible** de la potencia y la energía durante diversas fases del vuelo.

Un ejemplo notable de esta integración es la tecnología de turbohélice híbrida propuesta por algunas compañías. En este concepto, el motor de hidrógeno impulsa directamente una turbina generadora de energía eléctrica, que luego alimenta motores eléctricos para la propulsión. Esta configuración híbrida busca optimizar la eficiencia en la generación y el uso de energía, aprovechando la versatilidad de los sistemas eléctricos.

Otro enfoque es la implementación de tecnologías híbridas en aviones de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL). Algunos proyectos buscan combinar la propulsión de motores de hidrógeno con sistemas eléctricos para lograr aeronaves más eficientes y sostenibles en el ámbito de la movilidad aérea urbana.

La integración de tecnologías híbridas no solo puede mejorar la eficiencia energética sino también abordar desafíos específicos de la aviación, como el despegue silencioso y la reducción de emisiones durante las fases críticas del vuelo.

En resumen, la combinación de motores de hidrógeno con tecnologías eléctricas en aeronaves representa una evolución emocionante hacia soluciones más eficientes y sostenibles. Los ejemplos existentes y los proyectos en desarrollo en el ámbito de los turbohélices y eVTOL subrayan el potencial de esta integración para transformar la aviación hacia una mayor sostenibilidad y rendimiento.

3.3 Handling impulsado por hidrógeno

3.3.1 Equipamiento y vehículos de handling impulsados por hidrógeno

La transición hacia vehículos handling impulsados por hidrógeno en un aeropuerto conlleva una serie de transformaciones integrales en el equipamiento y la infraestructura, allanando el camino hacia un sistema de transporte terrestre más sostenible y eficiente.

En este proceso, la implementación de **estaciones de recarga** de hidrógeno desempeña un papel **crucial** como ya fue mencionado con anterioridad. Estas estaciones, estratégicamente ubicadas en puntos clave del aeropuerto, se convierten en nodos fundamentales para abastecer de manera eficiente y segura a la creciente flota de vehículos handling propulsados por hidrógeno.

En términos de equipamiento a bordo, los vehículos handling que aprovechan el hidrógeno como fuente de energía deben contar con sistemas de almacenamiento de última generación. Estos pueden incluir tanques de alta presión para almacenar hidrógeno gaseoso o tanques criogénicos para el almacenamiento de hidrógeno líquido. La elección entre estas tecnologías dependerá de diversos factores, como la eficiencia operativa del vehículo, la disponibilidad de infraestructura de recarga y la duración deseada del tiempo de operación continuo.

Uno de los atributos más destacados de esta transición es el impacto positivo en la reducción de emisiones contaminantes. Los vehículos handling que utilizan hidrógeno como combustible emiten únicamente vapor de agua como subproducto, contribuyendo así a la mejora significativa de la calidad del aire en el entorno aeroportuario. Este cambio hacia una movilidad más limpia no solo alinea al aeropuerto con prácticas sostenibles, sino que también contribuye a la creación de un entorno más saludable para los trabajadores y los pasajeros.

La eficiencia operativa se convierte en otro elemento central de esta transición. Los vehículos handling propulsados por hidrógeno ofrecen tiempos de recarga más rápidos en comparación con las tecnologías de batería, minimizando así los períodos de inactividad y mejorando la productividad en las operaciones aeroportuarias. Además, la mayor densidad energética del hidrógeno permite que estos vehículos tengan un rango de operación más extenso, proporcionando versatilidad para cumplir con diversas tareas en el complejo aeroportuario.

La implementación de vehículos handling de hidrógeno no solo implica la adquisición de tecnología avanzada, sino que también requiere una cuidadosa consideración de factores logísticos. La disponibilidad y la logística del hidrógeno, ya sea producido localmente mediante procesos de electrolisis o adquirido de fuentes externas, son elementos críticos para el funcionamiento exitoso de esta flota. Asimismo, se deben establecer rigurosos protocolos de seguridad y programas de capacitación para el personal encargado de operar y mantener tanto los vehículos como la infraestructura asociada.

En resumen, la transición hacia vehículos handling impulsados por hidrógeno no solo representa un cambio en la fuente de energía, sino que implica una transformación integral en la infraestructura y las prácticas operativas del aeropuerto. Desde la instalación de estaciones de recarga hasta la incorporación de vehículos avanzados, esta evolución no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también establece un estándar de eficiencia en las operaciones aeroportuarias del siglo XXI.

3.3.1.1 Tipos de vehículos de handling

En esta sección, exploraremos los diversos vehículos encargados de brindar asistencia en tierra, además de definir las funciones específicas de cada uno. Estos equipos operan en el lado aire del aeropuerto y se conocen comúnmente como Ground Support Equipment (GSE).

- **Tractor pushback:**

El tractor pushback es un vehículo utilizado en situaciones en las que una **aeronave**, al salir de su posición de estacionamiento, no puede maniobrar por sí misma y requiere ser **remolcada**. Estos vehículos, generalmente autopropulsados, poseen una potencia y peso significativos. **Actualmente**, la mayoría de ellos funcionan con motores de combustión **diésel**, lo que no solo resulta en un alto consumo de combustible sino también en emisiones contaminantes.

No obstante, vale la pena destacar la existencia de tecnologías más sostenibles, como los vehículos de remolque "**green pushback**", que forman flotas compuestas por versiones híbridas o eléctricas, siendo un ejemplo la implementación por parte de la compañía Iberia.



Figura 39. Tractor Pushback [31].

- **Camión de combustible:**

Estos vehículos suministran combustible a las aeronaves para su uso durante las operaciones. Se utilizan cuando no existen elementos de repostaje in situ (hidrantes) en la posición de estacionamiento. En el caso de que sí los haya, se requiere un dispensador para suministrar combustible de manera segura al avión.



Figura 40. Camión dispensador de combustible [31].

En la transformación hacia una tecnología de hidrógeno, en un aeropuerto con la capacidad de suministrar combustible a través de pits, se produciría una

transformación a vehículos que bombearían el combustible desde la red de hidrantes como se muestra en la figura 41:

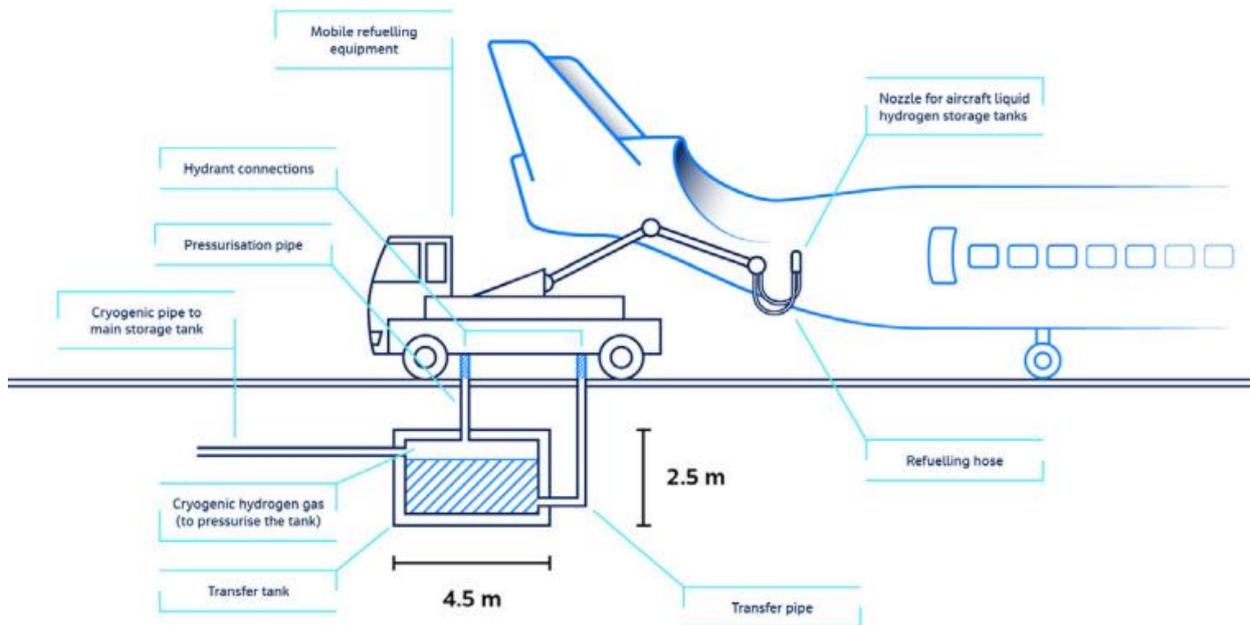


Figura 41. Camión de bombeo de combustible desde la red [20].

- **Camiones de handling:**

Existen varios tipos de vehículos que desempeñan diversas funciones, principalmente relacionadas con el handling, como catering, tratamiento de aguas residuales, transporte de equipajes, entre otros. Muchos de ellos están equipados con sistemas hidráulicos elevadores para facilitar las operaciones en las aeronaves.



Figura 42. Camión dispensador de combustible [31].

- **Camiones de deshielo:**

Estos vehículos contienen mezclas de glicol con el propósito de descongelar la aeronave y prevenir la formación de placas de hielo en sus superficies aerodinámicas, lo cual podría representar un riesgo para la seguridad. Este procedimiento se lleva a cabo en aeropuertos con temperaturas bajas.



Figura 43. Camión de deshielo [31].

- **Escalera móvil:** Las escaleras móviles son vehículos autopropulsados que incorporan una escalera para permitir el embarque y desembarque de pasajeros en posiciones de estacionamiento remotas. En posiciones de contacto, donde se utiliza una pasarela de embarque, estas no son necesarias.



Figura 44. Escalera móvil [31].

- **Vehículos PMRs:**

Principalmente camiones, estos transportan a personas con movilidad reducida y cuentan con un sistema de elevación para facilitar el servicio.



Figura 45. Vehículo transporte PMRs [31].

- **Jardineras:**

Las jardineras son autobuses utilizados para transportar pasajeros y tripulación en casos de estacionamientos remotos o cuando no se puede utilizar una pasarela de embarque.



Figura 46. Jardinera [31].

- **Tractor auxiliar:**

Estos vehículos se encargan principalmente del transporte de equipaje y carga entre las zonas de tratamiento y las aeronaves, y viceversa. Son clave debido a su versatilidad para adaptarse a diversas labores.



Figura 47. Tractor auxiliar [31].

- **Cinta transportadora autónoma:**

Este vehículo autopropulsado incorpora una cinta para facilitar la carga y descarga de equipaje en la bodega del avión. Se utiliza principalmente en aeronaves de pasajeros.



Figura 48. Cinta transportadora [31].

- **Vehículos de transporte interno:**

Son vehículos utilizados por el personal del aeropuerto para llevar a cabo sus tareas diarias, moviéndose dentro de las instalaciones del aeropuerto.

Un aspecto clave en este apartado es el precio de los propios vehículos convencionales. Siempre que surge una nueva tecnología, se tienden a establecer precios más elevados que, con el tiempo, van reduciéndose debido a la mejora de la tecnología y el interés de llegar a un público todavía más amplio.

En España solo hay disponibles **dos marcas** de coches que funcionen con esta tecnología debido al poco incentivo e interés en la industria actual. Para hacernos una idea de esto, solo se registraron 4 ventas de vehículos de hidrógeno en 2022 frente a las 5 de 2023. De esta forma los principales gobiernos deben incentivar el desarrollo de esta tecnología para así crear competencia y crear un mercado más accesible.

Los dos vehículos son:

- **Hyundai Nexø:**

Se empezó a comercializar en 2018 y se fabrica en la planta de Hyundai en Corea del Sur. Cuenta con **3 depósitos** de alta presión y una capacidad de 157 litros de hidrógeno que equivalen a 6,5 Kg.

- **Toyota Mirai:**

La marca japonesa lo lanzó en 2014. También cuenta con 3 depósitos de alta presión, pero una capacidad algo menor, de 142 litros, lo que son unos 5,6 Kg de hidrógeno.

Se adjunta un breve resumen de las principales características de ambos vehículos:

Vehículo	Hyundai Nexø	Toyota Mirai
Nº depósitos	3	3
Capacidad (Kg H2)	6,5	5,6
Autonomía (Km)	666	650
Potencia (CV)	163	182
Precio (€)	73500	75500

Tabla 8. Comparación ambos vehículos (elaboración propia) [33].



Figura 49. Vehículos convencionales propuestos [33].

En la siguiente ilustración se describe el funcionamiento de un vehículo de pila de combustible de manera simplificada. Se puede apreciar la boquilla a través de la cual se alimenta el tanque de combustible, así como el propio tanque de almacenamiento. El hidrógeno se conduce a la pila de combustible, donde se genera energía que acciona el motor eléctrico o se almacena en las baterías incorporadas.

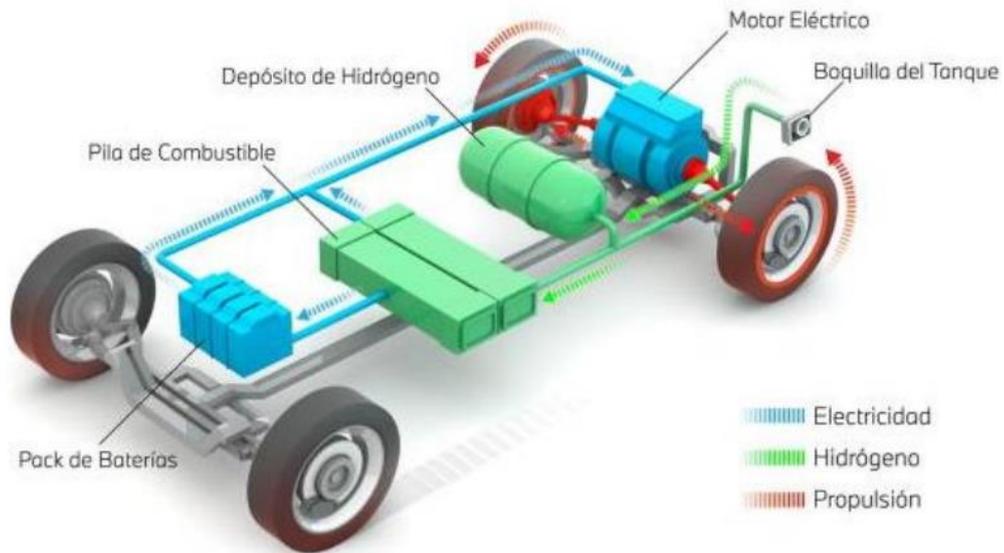


Figura 50. Esquema vehículo propulsado por hidrógeno [32].

El tiempo de llenado del depósito de un vehículo de pila de combustible dependerá del volumen de este y del caudal de repostaje obteniendo **un tiempo de llenado** medio de unos **5-6 minutos** por depósito, un tiempo estándar muy similar al correspondiente al combustible actual.

3.3.2 Estaciones de recarga

Como ya se especificó en la parte de infraestructura (3.1.1), la implementación de infraestructura de recarga de hidrógeno en áreas de handling del aeropuerto es un paso crucial para respaldar la transición hacia una movilidad más sostenible. Estas áreas de recarga deben diseñarse cuidadosamente para garantizar un suministro eficiente y seguro de hidrógeno a los equipos y vehículos utilizados en las operaciones diarias del aeropuerto.

En primer lugar, la **ubicación** estratégica de las estaciones de recarga es **fundamental**. Estas estaciones deben estar distribuidas estratégicamente en áreas clave del aeropuerto, como zonas de carga y descarga, estacionamientos de vehículos handling y áreas de mantenimiento. Al posicionar las estaciones de recarga de manera estratégica, se asegura que los vehículos puedan acceder fácilmente a estas instalaciones, minimizando el tiempo de inactividad y optimizando la eficiencia operativa.

En cuanto a la logística, se deben establecer procedimientos eficientes para el suministro de hidrógeno a estas estaciones. La adopción de sistemas de entrega programada y la coordinación con proveedores de hidrógeno son esenciales. La logística también abarca el almacenamiento temporal de hidrógeno en las estaciones de recarga. Las estaciones pueden contar con tanques de almacenamiento, ya sea para hidrógeno gaseoso o líquido, dependiendo de la infraestructura disponible y las necesidades operativas del aeropuerto.

En la práctica, existen diversos ejemplos de aeropuertos que ya han implementado exitosamente áreas de recarga de hidrógeno en sus operaciones handling. Un caso destacado es el aeropuerto de Los Ángeles (LAX), que ha introducido una estación de recarga de hidrógeno para sus vehículos de handling. Esta instalación permite la recarga rápida de vehículos, garantizando que estén listos para operar en cortos períodos de tiempo.

Otro ejemplo es el aeropuerto de Hamburgo en Alemania, que ha incorporado estaciones de recarga de hidrógeno en su infraestructura handling. Estas estaciones se han integrado en las áreas donde los vehículos de handling realizan sus operaciones diarias, facilitando un acceso conveniente y rápido para los equipos en servicio.

La seguridad es un aspecto crítico en la infraestructura de recarga de hidrógeno. Se deben implementar medidas de seguridad rigurosas, incluyendo sistemas de detección de fugas, protocolos de emergencia y capacitación del personal. Garantizar un entorno seguro para el manejo y la recarga de hidrógeno es esencial para el éxito a largo plazo de esta infraestructura.

En resumen, la infraestructura de recarga de hidrógeno en áreas de handling del aeropuerto es un componente esencial en la adopción de tecnologías más limpias y sostenibles. La planificación cuidadosa, la logística eficiente y la atención a la seguridad son elementos clave para asegurar el éxito de estas instalaciones y contribuir significativamente a la sostenibilidad ambiental en el entorno aeroportuario.

3.3.3 Tecnologías de almacenamiento de hidrógeno

También desglosado anteriormente (3.1.3), el almacenamiento de hidrógeno es una pieza fundamental dentro de la infraestructura aeroportuaria para el manejo (handling) impulsado por hidrógeno, ha sido previamente abordado en este trabajo en relación con su implementación en el transporte, suministro y uso en aeronaves.

Existen diversas tecnologías de almacenamiento que se integran en la infraestructura aeroportuaria, cada una adaptada a las necesidades específicas del handling y respaldando operaciones sostenibles.

- **Tanques de Almacenamiento de Hidrógeno:**

En el contexto del handling aeroportuario, los tanques de almacenamiento de alta presión pueden ser utilizados para abastecer vehículos y equipos, permitiendo un acceso rápido y eficiente al hidrógeno gaseoso. Esta tecnología, ya mencionada en secciones anteriores, proporciona una solución confiable y comúnmente utilizada para el almacenamiento de hidrógeno.

- **Tanques Criogénicos:**

Otra tecnología previamente destacada es la de los tanques criogénicos, esenciales para el almacenamiento de grandes cantidades de hidrógeno líquido necesario para abastecer a aeronaves. Garantizando una alta densidad de almacenamiento, estos tanques juegan un papel crucial en la distribución eficiente del hidrógeno líquido en cantidades voluminosas.

- **Tecnologías incipientes:**

Más allá de las tecnologías convencionales, se han explorado innovaciones en el almacenamiento de hidrógeno, como los materiales de absorción y los sistemas de almacenamiento químico. Estos enfoques emergentes representan áreas de investigación prometedoras para mejorar la eficiencia y la seguridad del almacenamiento de hidrógeno en el contexto del handling aeroportuario.

- **Integración en la Infraestructura:**

Estas tecnologías de almacenamiento, ya mencionadas en el contexto de la infraestructura aeroportuaria, se incorporan directamente para respaldar las necesidades específicas del handling. Los tanques de alta presión se pueden situar estratégicamente para abastecer vehículos de handling, mientras que los tanques criogénicos forman parte de instalaciones especializadas destinadas a aeronaves que requieren hidrógeno líquido.

La elección de la tecnología de almacenamiento se basará en factores como la demanda de hidrógeno por parte de la flota disponible, la frecuencia de suministro y los requisitos de espacio. La integración efectiva de estas tecnologías en la infraestructura aeroportuaria es crucial para garantizar un suministro confiable y eficiente de hidrógeno.

3.3.4 Procesos de mantenimiento e inspección de los vehículos

Los procesos de mantenimiento e inspección en vehículos de handling impulsados por hidrógeno son esenciales para garantizar un rendimiento seguro y eficiente a lo largo de su ciclo de vida. Estos procesos se centran en varios aspectos clave, desde la monitorización de sistemas de almacenamiento de hidrógeno hasta la verificación de componentes específicos para asegurar su integridad y funcionamiento óptimo.

- **Monitorización de Sistemas de Almacenamiento:**

El mantenimiento de vehículos handling incluye la supervisión regular de los sistemas de almacenamiento de hidrógeno. Se realizan inspecciones visuales y pruebas de fugas para identificar posibles problemas en los tanques de almacenamiento de alta presión y tanques criogénicos. Además, se emplean técnicas avanzadas, como pruebas ultrasónicas, para evaluar la integridad estructural de estos sistemas y garantizar que cumplan con los estándares de seguridad.

- **Verificación de Componentes Específicos:**

Los componentes específicos relacionados con la tecnología del hidrógeno, como las celdas de combustible y sistemas de distribución, requieren inspecciones periódicas. Estas inspecciones se centran en la detección de desgaste, corrosión u otros problemas que puedan afectar el rendimiento. Las pruebas de rendimiento de las celdas de combustible son cruciales para garantizar una eficiencia continua y la reducción de emisiones.

- **Actualizaciones y Mejoras Tecnológicas:**

El mantenimiento no se limita solo a la corrección de problemas existentes, sino que también implica la implementación de actualizaciones y mejoras tecnológicas. A medida que la tecnología del hidrógeno evoluciona, los vehículos handling pueden beneficiarse de actualizaciones de software, mejoras en los sistemas de gestión de energía y nuevas tecnologías de almacenamiento que mejoren la eficiencia y la seguridad.

- **Formación del Personal:**

El personal encargado del mantenimiento debe recibir formación especializada en tecnologías de hidrógeno. Esto incluye comprensión de los procedimientos de seguridad específicos del hidrógeno, así como la identificación y manejo de posibles problemas. La formación continua es esencial para mantenerse al día con las últimas tecnologías y prácticas de seguridad.

- **Coordinación con Fabricantes y Proveedores:**

El mantenimiento efectivo de vehículos handling impulsados por hidrógeno implica una estrecha colaboración con fabricantes y proveedores de tecnología de hidrógeno. Estas asociaciones permiten acceder a información técnica actualizada, manuales de mantenimiento específicos y la adquisición de repuestos originales, asegurando un servicio de alta calidad.

En resumen, el mantenimiento en vehículos handling con tecnología de hidrógeno es un proceso integral que abarca desde la monitorización de sistemas críticos hasta la formación del personal y la coordinación con fabricantes. Estos procesos son esenciales para garantizar operaciones seguras y eficientes en el entorno aeroportuario. Por ello habría que contar con un personal capacitado y formado al respecto.

3.3.5 Capacitación del personal

Al igual que se comentó en la parte de infraestructura (3.1.6), la capacitación del personal encargado del manejo de equipos impulsados por hidrógeno también es un componente crucial para garantizar un entorno de trabajo seguro y eficiente. Los procedimientos operativos deben abordarse de manera integral, y los empleados deben recibir una formación especializada que cubra desde la manipulación segura del hidrógeno hasta la operación adecuada de los equipos.

- **Procedimientos Operativos Seguros:**

La capacitación comienza con la comprensión de los procedimientos operativos seguros al trabajar con tecnologías de hidrógeno. Esto incluye pautas para el manejo de equipos de carga y descarga de hidrógeno, la conexión y desconexión segura de mangueras, y la identificación y respuesta a posibles fugas. Se enfatiza la importancia de seguir protocolos de seguridad establecidos para minimizar riesgos.

- **Manipulación Segura del Hidrógeno:**

El personal debe recibir una formación detallada sobre la manipulación segura del hidrógeno, abordando aspectos como la conexión y desconexión de mangueras de suministro, el uso correcto de equipos de protección personal y la comprensión de las propiedades del hidrógeno. Los simulacros prácticos pueden ser parte integral de la formación para garantizar que los empleados estén preparados para situaciones reales.

- **Operación Adecuada de Equipos:**

La formación se extiende a la operación específica de los equipos handling impulsados por hidrógeno. Esto incluye el manejo de vehículos, sistemas de carga, y cualquier equipo asociado. Se enseñan las características técnicas de los equipos, los procedimientos de arranque y apagado, y cómo responder a posibles problemas operativos.

- **Identificación y Respuesta a Emergencias:**

La capacitación debe preparar al personal para identificar y responder a situaciones de emergencia. Esto abarca desde la activación de sistemas de seguridad hasta la evacuación eficiente en caso de fugas o problemas críticos. Se proporcionan conocimientos sobre el uso de equipos de seguridad, como extintores, y se practican procedimientos para garantizar respuestas rápidas y efectivas.

- **Ejemplos Prácticos:**

La capacitación no solo se basa en conceptos teóricos, sino que también incorpora ejemplos prácticos. Los empleados pueden participar en simulacros de emergencia, situaciones de carga y descarga de hidrógeno, y operaciones diarias. Estos ejemplos prácticos permiten una aplicación real de los conocimientos adquiridos y refuerzan la comprensión de los procedimientos operativos.

La capacitación continua es esencial para mantener al personal actualizado sobre las últimas tecnologías y prácticas de seguridad. La colaboración con fabricantes y expertos en tecnología de hidrógeno también puede ser beneficiosa para garantizar que el personal esté informado sobre las actualizaciones y mejoras en los equipos. En última instancia, una fuerza laboral capacitada contribuye significativamente a la seguridad y eficiencia en entornos de handling aeroportuario.

3.3.6 Certificaciones y normativa

La certificación y normativa relacionada con el handling aeroportuario, especialmente en el contexto de la transición hacia tecnologías basadas en hidrógeno, comparten muchos elementos con la normativa previamente discutida en el punto de infraestructura aeroportuaria (3.1.8).

- **Normativa Común:**

La certificación de equipos y procedimientos en el handling aeroportuario está sujeta a regulaciones específicas para garantizar la seguridad, eficiencia y sostenibilidad. En gran medida, estas regulaciones tienen similitudes con las normativas aplicables a la infraestructura aeroportuaria en general, ya que ambas comparten el objetivo de establecer estándares robustos para la operación segura y eficiente.

- **Certificación de Equipos Handling a Base de Hidrógeno:**

En el contexto del manejo de hidrógeno en aeropuertos, la certificación se centra en validar la seguridad y conformidad de los equipos específicos que utilizan esta tecnología. Esto abarca vehículos handling, sistemas de carga y descarga de hidrógeno, así como cualquier infraestructura asociada. Los estándares para la certificación se basan en normativas específicas que consideran las propiedades del hidrógeno y los protocolos de seguridad asociados.

- **Adaptación de Normativas Existentes:**

Dado que la introducción de tecnologías de hidrógeno en el handling aeroportuario es un desarrollo relativamente reciente, la normativa existente puede requerir adaptaciones para abordar aspectos específicos relacionados con la manipulación, almacenamiento y transporte de hidrógeno. Las autoridades reguladoras trabajan en colaboración con expertos en seguridad y tecnología para desarrollar directrices que aborden los desafíos únicos asociados con el hidrógeno.

- **Certificación Ambiental:**

En consonancia con la tendencia hacia la sostenibilidad, la certificación no solo se centra en la seguridad operativa, sino también en el impacto ambiental. Equipos y procedimientos que utilizan hidrógeno pueden ser evaluados en términos de eficiencia energética y reducción de emisiones, contribuyendo así a los objetivos más amplios de sostenibilidad de la industria de la aviación.

- **Colaboración con Organismos Internacionales:**

La certificación en el ámbito del handling aeroportuario a base de hidrógeno a menudo implica la colaboración con organismos internacionales que establecen estándares globales. La estandarización facilita la interoperabilidad y la adopción generalizada de tecnologías basadas en hidrógeno en aeropuertos de todo el mundo.

- **Formación del Personal:**

La normativa incluye requisitos para la formación del personal, asegurando que estén capacitados en los procedimientos específicos y las precauciones de seguridad asociadas con el manejo de hidrógeno. Esta formación está diseñada para garantizar

que los operadores estén familiarizados con las características únicas del hidrógeno y puedan responder efectivamente a cualquier situación.

En resumen, la certificación y normativa en el ámbito del handling aeroportuario, especialmente en el contexto del hidrógeno, se alinean estrechamente con las regulaciones existentes para la infraestructura aeroportuaria, adaptándose para abordar las características específicas y los desafíos asociados con la transición hacia tecnologías más limpias y sostenibles.

3.3.7 Integración con sistemas existentes

La integración del sistema de handling de hidrógeno en los aeropuertos se planifica de manera estratégica, priorizando la minimización de interrupciones y facilitando una transición gradual. Este proceso evolutivo implica varias etapas que garantizan la compatibilidad con los sistemas existentes y permiten la adopción progresiva de tecnologías basadas en hidrógeno.

- **Análisis de Infraestructura Existente:**

Se realiza un análisis exhaustivo de la infraestructura aeroportuaria existente, evaluando la viabilidad de integrar tecnologías de hidrógeno. Esto incluye la identificación de áreas clave como estacionamientos, zonas de carga y descarga, y espacios de almacenamiento que se pueden adaptar para acomodar vehículos y equipos handling basados en hidrógeno.

- **Compatibilidad de Equipos Handling:**

Se considera la compatibilidad de los equipos handling con la infraestructura existente. En muchos casos, los vehículos handling impulsados por hidrógeno se diseñan para ser interoperables con los sistemas convencionales, permitiendo una transición fluida sin la necesidad de reemplazar toda la flota de manejo de carga.

- **Estándares de Interfaz:**

Se establecen estándares de interfaz que facilitan la conexión entre los sistemas de manejo de hidrógeno y los sistemas convencionales. Esto abarca desde los protocolos de carga y descarga hasta la coordinación logística en áreas compartidas. Estos estándares aseguran una integración sin problemas y permiten la coexistencia armoniosa de las dos tecnologías.

- **Infraestructura de Recarga Gradual:**

La implementación de estaciones de recarga de hidrógeno se realiza de manera gradual en áreas estratégicas del aeropuerto. Esto garantiza que los vehículos handling basados en hidrógeno puedan recargarse convenientemente durante las operaciones diarias, minimizando el impacto en los tiempos de servicio y evitando interrupciones significativas.

- **Formación y Concienciación:**

Se implementan programas de formación y concientización para el personal del aeropuerto, enfocados en las nuevas prácticas asociadas con el manejo de hidrógeno. Esto incluye la formación en procedimientos de seguridad, mantenimiento y operación específicos de vehículos handling impulsados por hidrógeno.

- **Fases Piloto y Monitoreo:**

Se introducen fases piloto para evaluar la eficiencia y seguridad del sistema de handling de hidrógeno. Durante estas fases, se monitorea de cerca el rendimiento, se recopilan datos operativos y se realizan ajustes según sea necesario antes de una implementación a escala completa.

- **Actualización de Políticas y Regulaciones:**

A medida que avanza la transición, se actualizan las políticas y regulaciones del aeropuerto para reflejar los nuevos estándares de seguridad y operación asociados con el manejo de hidrógeno. Esto garantiza la conformidad con las normativas y la coherencia en todas las operaciones.

La integración progresiva del sistema de handling de hidrógeno se enfoca en la continuidad operativa, la eficiencia y la seguridad, permitiendo que las aerolíneas y aeropuertos adopten gradualmente las ventajas de esta tecnología emergente sin comprometer la calidad y la seguridad de las operaciones aeroportuarias.

3.3.7.1 Impacto en las aerolíneas

Un aspecto muy importante en esta transición es el impacto en la **rotación** de la **aeronave**, que es una parte integral en la operación de una aerolínea. El objetivo de todas las aerolíneas es minimizar los tiempos de handling en tierra para que el avión esté en el aire el máximo tiempo posible, y por lo tanto se maximicen los ingresos y minimicen los costes.

La implementación del reabastecimiento de hidrógeno líquido podría plantear desafíos al proceso de respuesta, incluyendo la posibilidad de **tiempos** de respuesta **más prolongados**, requisitos de distancia de seguridad ampliados y la necesidad de adoptar nueva tecnología.

Los tiempos de respuesta típicamente se calculan desde que una aeronave llega al puesto de estacionamiento y se encuentra inmovilizada hasta que se retira del puesto y está lista para partir.

En este periodo de tiempo la aeronave recibe servicio con muchas actividades simultáneas como el desembarque, descarga, limpieza, abastecimiento, carga de combustible y embarque.

Los cambios más lentos en el proceso de reabastecimiento resultan en que las aeronaves permanezcan en el puesto de estacionamiento durante **períodos más prolongados**, reduciendo así el tiempo disponible de vuelo y ocupando la capacidad de estacionamiento en la plataforma del aeropuerto. En aeropuertos donde la capacidad es limitada y las aerolíneas ya han optimizado sus horarios de vuelo, hay poco margen para extender el tiempo en tierra.

En muchos aeropuertos, el reabastecimiento de combustible se lleva a cabo de manera conjunta con otras actividades, sin embargo, la implementación de hidrógeno líquido podría introducir el reabastecimiento de combustible de forma independiente, lo que potencialmente prolongaría los tiempos de respuesta.

El proceso de llenado de tanques de hidrógeno en las aeronaves requerirá una zona de seguridad debido a su alto riesgo de inflamabilidad. Para garantizar la continuidad de las actividades simultáneas, las normas de seguridad, regulaciones y procedimientos operativos deben evolucionar en consonancia con la tecnología.

El reabastecimiento con hidrógeno líquido utilizando la misma manguera de diámetro y caudal tomaría más tiempo que con queroseno, subrayando la necesidad de **mangueras de mayor diámetro** y la posibilidad de utilizar varias mangueras de reabastecimiento simultáneamente para agilizar el proceso.

Algunas entidades, como la NASA llevaron a cabo pruebas con hidrógeno en viajes espaciales y otros gases comprimidos. Los resultados indicaron una distancia de separación que, extrapolada al sector, oscilaría entre 20 y 60 metros para personas no autorizadas a ingresar en esta área.

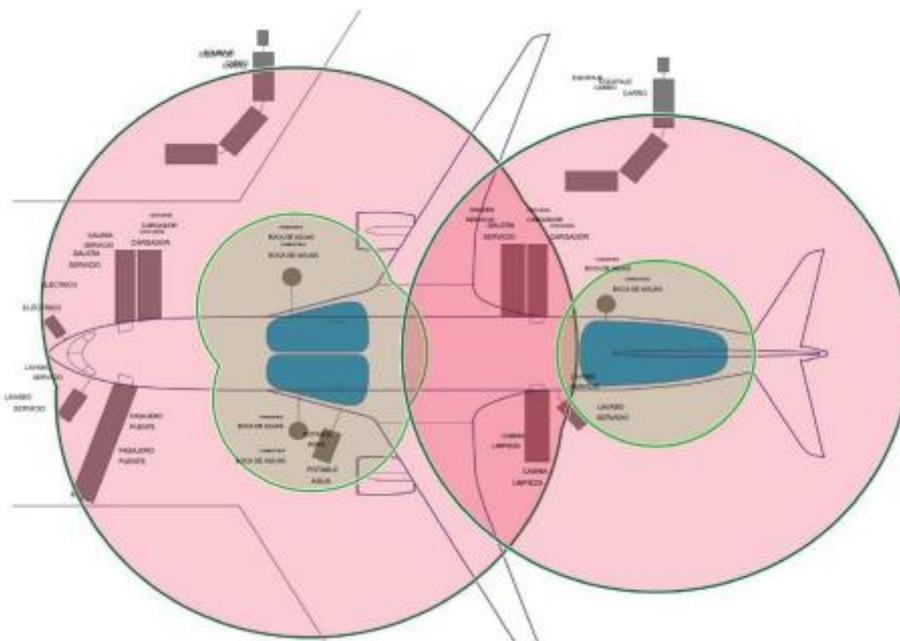


Figura 51. Diámetro de seguridad durante el repostaje de hidrógeno [20].

Como se puede apreciar en la imagen anterior, las zonas de seguridad referentes al reabastecimiento de hidrógeno (**rojo**) son mucho mayores que las que existen actualmente con el queroseno (**verde**).

Se deberá tener en cuenta el **peso** y el **equilibrio** de la aeronave durante el reabastecimiento de combustible y el proceso de carga/descarga para **evitar** que los **tanques** se **vuelquen** debido a que los tanques con mayor capacidad se encuentran en la parte trasera de la aeronave, a diferencia de las aeronaves convencionales.

En situaciones de **derrame** o **fuga** de hidrógeno líquido durante el transporte, almacenamiento o reabastecimiento de combustible, es crucial seguir ciertos protocolos para garantizar la seguridad:

- **Aislar:**

En primer lugar, es fundamental aislar la zona afectada para prevenir la propagación del hidrógeno y reducir el riesgo de incidentes.

- **Dejar Evaporar:**

Permitir que el hidrógeno se evapore es parte del proceso de mitigación, facilitando su dispersión en forma gaseosa y reduciendo la concentración de vapor inflamable.

- **Evitar el Contacto con Fuentes de Ignición:**

Durante cualquier fuga, se debe evitar el contacto con fuentes de ignición para prevenir posibles incendios o explosiones.

- **Usar Desviaciones:**

La implementación de desviaciones seguras es esencial para canalizar el hidrógeno de manera controlada y minimizar el impacto ambiental y de seguridad.

En el marco de la detección de fugas, se deben considerar cuidadosamente los puntos potenciales de fuga en las tuberías y evaluar su impacto en otras infraestructuras. La instalación de instrumentos, sensores y medidores de detección de fugas a lo largo de todo el proceso de transporte, almacenamiento y reabastecimiento de combustible es crucial para detectar fugas de manera temprana y así minimizar los riesgos.

Tiempos de Rotación (min)	Sin Actividades Simultáneas	Alguna Actividad Simultánea	Actividades Simultáneas
Regional	42	46	130
Pasillo Estrecho	32	35	100
Doble Pasillo	23	27	60

Tabla 9. Propiedades del hidrógeno frente a combustibles convencionales [20].

Diversas tecnologías de detección de gases pueden ser consideradas para identificar fugas de hidrógeno en diferentes puntos, particularmente en la rampa del aeropuerto. La pronta detección de fugas es fundamental para mitigar las consecuencias y salvaguardar la seguridad.

3.3.8 Gestión de residuos y sostenibilidad

La gestión sostenible de residuos derivados del uso del hidrógeno en operaciones handling se erige como un pilar fundamental para abordar el impacto ambiental de manera efectiva. Esta estrategia busca minimizar la generación de residuos y promover prácticas de manejo responsables que contribuyan a la sostenibilidad ambiental.

- **Reducción en la Generación de Residuos:**

Se implementan medidas para reducir la generación de residuos en las operaciones handling. Esto incluye la optimización de procesos, la reutilización de materiales siempre que sea posible y la adopción de prácticas de consumo consciente. La introducción de tecnologías de hidrógeno se acompaña de estrategias que buscan minimizar la producción de residuos no deseables.

- **Reciclaje de Residuos Específicos:**

Se establecen programas de reciclaje específicos para los residuos generados en el contexto del manejo de hidrógeno. Esto abarca desde baterías de vehículos hasta componentes de celdas de combustible. Se promueve la recolección selectiva y el tratamiento adecuado para garantizar que los materiales recuperables se reincorporen a la cadena productiva.

- **Evaluación del Impacto Ambiental:**

Se lleva a cabo una evaluación detallada del impacto ambiental de los residuos derivados del manejo de hidrógeno. Esto implica analizar el ciclo de vida completo, desde la producción hasta la disposición final, considerando aspectos como las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de recursos. La información obtenida orienta las decisiones estratégicas para reducir aún más el impacto ambiental.

- **Energía Renovable en Procesos de Tratamiento:**

Los procesos de tratamiento y disposición de residuos se alimentan con energía renovable siempre que sea posible. La adopción de fuentes de energía limpia contribuye a la reducción de emisiones asociadas con las operaciones de manejo de residuos. Se exploran soluciones como la incineración controlada y la conversión de residuos en energía.

- **Innovación en Materiales Sostenibles:**

Se fomenta la investigación y adopción de materiales sostenibles en la fabricación de componentes de hidrógeno. La sustitución de materiales menos sostenibles por alternativas ecológicas contribuye a reducir la huella ambiental de los residuos generados durante la operación y mantenimiento de equipos handling.

- **Programas de Educación y Concientización:**

Se implementan programas de educación y concientización para el personal involucrado en operaciones handling. La formación incluye pautas claras sobre la gestión de residuos y subproductos derivados del uso del hidrógeno, promoviendo la

adhesión a prácticas sostenibles y resaltando la importancia de la contribución individual al cuidado del medio ambiente.

Por ello será crucial adoptar estas prácticas eficientes y ambientalmente conscientes para minimizar el impacto ambiental asociado con la producción, almacenamiento y transporte de hidrógeno. Este enfoque asegura no solo la viabilidad técnica sino también el cumplimiento de una visión de aviación más limpia y sostenible a largo plazo. También se tendrá que hacer un control para el cumplimiento de estas.

3.3.9 Innovaciones tecnológicas en el handling

En el ámbito del handling aeroportuario, las innovaciones tecnológicas han revolucionado la eficiencia y la sostenibilidad de las operaciones. Una de las áreas clave de innovación se centra en los sistemas de gestión de flotas, que han experimentado mejoras significativas gracias a la implementación de tecnologías avanzadas. La introducción de sistemas de **rastreo** y **monitoreo** en tiempo real ha permitido una supervisión más precisa de la ubicación y el estado de los vehículos de handling, lo que optimiza las rutas y reduce los tiempos de espera.

Además, la **automatización** ha emergido como una solución eficiente en el manejo de equipaje y carga. Sistemas autónomos, como vehículos guiados automáticamente (AGV) y robots de manejo de carga, han mejorado la velocidad y precisión en las operaciones, disminuyendo los tiempos de respuesta y minimizando errores humanos. Estas soluciones autónomas también ofrecen una mayor flexibilidad en la adaptación a cambios en la demanda y las condiciones operativas.

Los sensores inteligentes permiten la recopilación de datos en tiempo real sobre las condiciones del entorno y el rendimiento de los equipos, facilitando la toma de decisiones basada en datos para optimizar aún más las operaciones.

En el contexto de la transición hacia el hidrógeno, las innovaciones tecnológicas se centran en el desarrollo de sistemas de recarga avanzados para vehículos y equipos de handling. Estaciones de recarga inteligentes, que pueden ajustar dinámicamente los tiempos de carga según la demanda y el estado de la red, están emergiendo como una solución eficiente.

En resumen, las innovaciones tecnológicas en el handling aeroportuario están transformando la forma en que se gestionan las flotas, se manejan las cargas y se coordinan las operaciones. Estas mejoras no solo aumentan la eficiencia, sino que también contribuyen a la sostenibilidad y la adaptabilidad de las operaciones aeroportuarias.

3.3.10 Evaluación en el largo plazo

La implementación del handling aeroportuario impulsado por hidrógeno conlleva una serie de consideraciones económicas cruciales, que pueden analizarse mediante una evaluación detallada de costos, beneficios e inversiones asociadas. A continuación, se presenta un desglose que aborda diversos aspectos económicos

- **Inversiones Iniciales:**

Adquisición de Vehículos y Equipos: La transición a vehículos y equipos handling impulsados por hidrógeno requerirá una inversión inicial significativa en la compra de flotas y maquinaria compatibles con esta tecnología.

Infraestructura de Recarga: La instalación de estaciones de recarga de hidrógeno en el aeropuerto representa un costo inicial considerable, incluyendo la implementación de sistemas de almacenamiento y dispensadores.

- **Costos Operativos:**

Costo del Hidrógeno: Aunque el hidrógeno se considera un combustible limpio, su producción y suministro conllevan costos operativos. Evaluar el costo del hidrógeno es esencial para entender el impacto en la operación diaria.

Mantenimiento: Los costos de mantenimiento de vehículos y equipos handling impulsados por hidrógeno deben considerarse en comparación con las alternativas tradicionales.

- **Beneficios Operativos:**

Eficiencia y Rendimiento: La transición al hidrógeno puede resultar en beneficios operativos, como una mayor eficiencia en el manejo de carga y una menor dependencia de combustibles fósiles.

Reducción de Emisiones: La adopción de tecnologías de hidrógeno puede contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, alineándose con objetivos ambientales.

- **Retorno de Inversión (ROI):**

Tiempo de Amortización: El cálculo del tiempo necesario para amortizar las inversiones iniciales a través de ahorros operativos y beneficios ambientales es esencial para evaluar el ROI a largo plazo.

Consideraciones Financieras: Factores como tasas de interés y condiciones financieras pueden influir en la viabilidad económica del proyecto.

- **Incentivos y Subvenciones:**

Identificación de Incentivos: Explorar posibles incentivos gubernamentales o subvenciones disponibles para la adopción de tecnologías limpias puede mejorar la perspectiva económica.

Beneficios Tributarios: Evaluar beneficios tributarios asociados con la transición al hidrógeno puede proporcionar alivio financiero.

En resumen, una evaluación económica integral del handling aeroportuario impulsado por hidrógeno requiere un análisis detallado de costos y beneficios a lo largo del tiempo, considerando tanto los aspectos operativos como los financieros. Este enfoque estratégico permitirá a los aeropuertos tomar decisiones informadas y sostenibles en su camino hacia la descarbonización.

4. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

4.1 Conclusión

El análisis detallado de la viabilidad de adoptar el hidrógeno como combustible en el sector aeroportuario revela perspectivas prometedoras, aunque acompañadas de desafíos específicos.

El hidrógeno, como demostramos en este trabajo, emerge como una opción óptima para cumplir la función de combustible en la aviación, destacando su potencial para reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero.

Las modificaciones necesarias en las aeronaves actuales, especialmente en la reubicación de los tanques de combustible, no se presentan como obstáculos insuperables, y los costos asociados no son excesivamente elevados. Sin embargo, es crucial destacar que la implementación de proyectos aeroportuarios de esta magnitud requiere una planificación a largo plazo, considerando el tiempo significativo que lleva llevar a cabo estas iniciativas.

Los desafíos económicos asociados con la infraestructura de los aeropuertos también se identifican como un factor clave. Los gestores aeroportuarios podrían ser más propensos a realizar inversiones sustanciales si se les proporcionan incentivos adecuados, considerando el impacto positivo a largo plazo en términos de sostenibilidad y eficiencia.

Desde la perspectiva del cliente, la transición a aeronaves alimentadas por hidrógeno promete una experiencia de vuelo igualmente positiva a la de las aeronaves convencionales. Esta percepción positiva, combinada con los beneficios medioambientales sustanciales, podría generar una adopción masiva y respaldo de los pasajeros.

La transición hacia aeronaves alimentadas por hidrógeno implica cambios significativos en la infraestructura aeroportuaria y los vehículos de handling. La infraestructura actual debe adaptarse para albergar aeronaves con sistemas de almacenamiento y manejo de hidrógeno, lo que implica inversiones sustanciales en infraestructuras de reabastecimiento y almacenamiento seguras.

La distribución en el aeropuerto, aunque similar a los combustibles existentes, requerirá soluciones complejas para el manejo del hidrógeno líquido. Mantener los tiempos de recarga y las zonas de seguridad serán desafíos cruciales, y estudios, simulaciones y pruebas de riesgo serán necesarios.

Se propone inicialmente la producción remota y la entrega por camiones, pero con el aumento de la demanda, los aeropuertos más grandes podrían requerir entregas a través de gasoductos, con posible licuefacción in situ. La viabilidad de la producción in situ también dependerá de la capacidad eléctrica disponible y del desarrollo de tecnologías.

Los vehículos de handling, esenciales para la operación eficiente en tierra, también necesitarán adaptaciones para el manejo seguro del hidrógeno. La introducción de medidas de seguridad específicas y la actualización de flotas de vehículos son elementos cruciales para garantizar una transición fluida y segura en los aeropuertos.

Estos ajustes, aunque representan desafíos logísticos, se justifican por los beneficios a largo plazo que conlleva la adopción del hidrógeno en la aviación, contribuyendo a una operación aeroportuaria más sostenible y eficiente.

En términos medioambientales, la adopción generalizada del hidrógeno en la aviación representaría una reducción significativa de la huella de carbono y las emisiones de gases de efecto invernadero. Este impacto positivo en la sostenibilidad ambiental se alinea con las crecientes demandas de un transporte más limpio y responsable.

El impacto de aeronaves impulsadas por hidrógeno en la formación de estelas de condensación y la adaptación del sistema de gestión de tráfico aéreo requerirán más investigación. La mejora de la eficiencia del espacio aéreo puede reducir la demanda de infraestructura y energía renovable para la producción de hidrógeno.

En resumen, aunque los proyectos de esta envergadura necesitan tiempo y recursos considerables, la viabilidad a medio y largo plazo es evidente. La colaboración continua entre la industria de la aviación y las partes interesadas externas es esencial para superar los desafíos y avanzar hacia un sector aeroportuario más próspero y sostenible. La visión compartida es la de convertir a la aviación en una opción de transporte accesible y preferida por todos, promoviendo un futuro más limpio y sostenible para nuestro planeta.

4.2 Líneas futuras

La evolución hacia la aviación con hidrógeno demanda el establecimiento de infraestructuras aeroportuarias especializadas. Se requiere una investigación profunda para diseñar sistemas seguros y eficientes de almacenamiento y distribución de hidrógeno en aeropuertos. Esta adaptación permitirá el abastecimiento efectivo de aeronaves propulsadas por hidrógeno, allanando el camino hacia una operación aeroportuaria más sostenible.

- **Innovación en Tecnologías de Aeronaves:**

La constante búsqueda de mejoras en la eficiencia y rendimiento de las aeronaves propulsadas por hidrógeno es esencial. Se espera que la investigación continúa conduzca a desarrollos tecnológicos y al uso de materiales más avanzados. Estas innovaciones contribuirán a la creación de aeronaves más ligeras y eficientes, fundamentales para el éxito a largo plazo de la aviación sostenible.

- **Optimización de Procesos de Handling:**

La adaptación de los vehículos de handling es crucial para garantizar operaciones seguras en tierra. El desarrollo de procesos eficientes y protocolos de seguridad para el reabastecimiento de hidrógeno en tierra es esencial. Esta optimización no solo mejora la seguridad operativa, sino que también facilita la transición a vehículos y operaciones compatibles con el hidrógeno.

- **Transformación de la infraestructura:**

La transición hacia la aviación con hidrógeno demanda una reconfiguración integral de la infraestructura aeroportuaria. La creación de sistemas de almacenamiento y distribución de hidrógeno seguros y eficientes se presenta como una necesidad primordial. La planificación y construcción de instalaciones especializadas para el manejo de este combustible innovador son fundamentales para respaldar la operación de aeronaves propulsadas por hidrógeno.

La evolución de la infraestructura aeroportuaria para adaptarse a las necesidades específicas de la aviación con hidrógeno constituye un paso crítico en la transformación hacia un sector más sostenible.

- **Impacto Medioambiental y Sostenibilidad:**

La evaluación continua del impacto ambiental de la aviación con hidrógeno es imperativa. Esto implica considerar no solo las emisiones de gases de efecto invernadero sino también otros contaminantes. La investigación constante sobre prácticas y tecnologías adicionales permitirá maximizar la sostenibilidad ambiental en el sector de la aviación.

- **Normativas y Estándares Internacionales:**

La colaboración con organismos reguladores es esencial para establecer estándares internacionales de seguridad y operación específicos para la aviación con hidrógeno. El desarrollo de regulaciones específicas respaldará la adopción segura y eficiente de tecnologías de hidrógeno en la industria aeronáutica a nivel mundial.

- **Educación y Concientización:**

La implementación exitosa de tecnologías de hidrógeno en la aviación requiere programas de formación y concientización. Estos programas deben dirigirse tanto a profesionales de la aviación como a personal de aeropuertos y pasajeros. La educación constante es clave para asegurar la comprensión y aceptación generalizada de las nuevas prácticas y tecnologías asociadas con la aviación de hidrógeno.

- **Perfiles de aproximación en ascenso y descenso:**

Las aproximaciones a aeropuertos que se realizan con los combustibles convencionales contribuyen a emisiones innecesarias de gases de efecto invernadero en nuestra atmósfera, limitando la capacidad y el crecimiento del tráfico aéreo, así como generando ineficiencias en la gestión del tráfico aéreo.

Esto se traduce en un uso de combustible de en torno al 10% en vuelos europeos en comparación con los vuelos más eficientes. La ineficiencia también se ve afectada por las limitaciones en las redes de rutas. Abordar estos problemas a nivel nacional e internacional es crucial para reducir sustancialmente las emisiones de CO₂ en la aviación y respaldar operaciones de aeronaves con cero emisiones de carbono.

Mejorar la eficiencia de las trayectorias de vuelo puede lograrse mediante la implementación generalizada de operaciones de ascenso y descenso continuo, lo que resalta la importancia de adoptar tecnologías más sostenibles, como el hidrógeno como combustible, para abordar estos desafíos y mejorar la eficiencia general del transporte aéreo.



Figura 52. Diámetro de seguridad durante el repostaje de hidrógeno [20].

PRESUPUESTO

Es importante destacar que los presupuestos presentados a continuación son **estimaciones** basadas en el estado **actual** de la tecnología de hidrógeno en la aviación. Dada la naturaleza dinámica de la innovación en este campo, estos costos son susceptibles de variación en función de avances tecnológicos, cambios en regulaciones y mejoras en la eficiencia de los procesos.

La evolución de la tecnología del hidrógeno y la optimización de las soluciones podrían tener un impacto significativo en los presupuestos, tanto reduciendo costos como permitiendo nuevas oportunidades. Por lo tanto, se recomienda una revisión constante de estas estimaciones a medida que avanza la investigación y desarrollo en el ámbito de la aviación con hidrógeno.

Presupuesto para infraestructuras:

La implementación exitosa de la tecnología de hidrógeno en el ámbito aeroportuario requiere una inversión significativa en infraestructuras. La construcción de hidrogeneras, estaciones de recarga, y la adaptación de las instalaciones aeroportuarias para el manejo seguro del hidrógeno son elementos cruciales. Este presupuesto contempla los costos asociados con la planificación y construcción de infraestructuras adecuadas para almacenamiento, distribución y suministro de hidrógeno en el aeropuerto.

Como ya se comentó en el apartado de infraestructura las estimaciones de los pilares fundamentales de esta categoría son:

- **Hidrogeneras:**

Los precios oscilarán en función del tamaño de esta como se indicó en el apartado 3.1.1.1. Por ello tomamos esta estimación:

Tamaño Aeropuerto	Pequeño	Mediano	Grande
Nº Hidrogeneras	1	2	4
Precio	150 K€	700 K€	5 - 6 M€

Tabla 10. Suma precio hidrogeneras para tres casos [10].

- **Conductos:**

Teniendo en cuenta que el precio actual promedio de las tuberías que transportan combustible fósil es de unos 75 € por metro en el caso de acero y unos 30 € por metro en el caso de polietileno [34]:

Tamaño Aeropuerto	Pequeño	Mediano	Grande
Long. Tuberías (Km)	2 - 3	5 - 10	15 - 20
Precio Tub. Acero	150 - 225 K€	375 - 750 K€	1,125 - 1,5 M€
Precio Tub. Polietileno	60 - 90 K€	150 - 300 K€	450 - 600 K€

Tabla 11. Presupuesto tuberías combustible tradicional para tres casos [34].

Para el caso de **hidrógeno** estaríamos hablando de un precio promedio de 150 € por metro para el **acero** inoxidable y unos 300 € por metro para el **titanio**. Esto es debido a la reactividad del hidrógeno y su facilidad para corroer los materiales. Siendo estos materiales más caros que los utilizados en las tuberías de transporte de combustible convencional [35].

Tamaño Aeropuerto	Pequeño	Mediano	Grande
Precio Tub. Acero (miles €)	300 - 450 K€	0,75 - 1,5 M€	2,25 - 3 M€
Precio Tub. Titanio (miles €)	600 - 900 K€	1,5 - 3 M€	4,5 - 6 M€

Tabla 12. Presupuesto tuberías hidrógeno en tres casos [35].

Es importante tener en cuenta que estos precios son sólo una guía. El precio real de una tubería puede variar en función de la especificación del material, diámetro, espesor de la pared y longitud de la tubería. Además, las longitudes de tuberías tomadas dependerán de cada aeropuerto a estudiar.

- **Almacenamiento:**

Al igual que se hizo anteriormente en este apartado hay que diferenciar el caso del almacenamiento gaseoso y líquido. Aunque este análisis ya vendría dentro del propio coste de la hidrogenera, pero para establecer una guía de los costes de esta infraestructura, se analiza a continuación.

Para el caso **gaseoso**, los materiales y la tecnología son más económicos al no alcanzarse temperaturas tan bajas. Por ello un tanque de 10 m³ de materiales compuestos (acero y fibra de carbono) rondaría los **15.000 €** [36].

Evidentemente el precio dependerá del tipo de material utilizado, volumen, tecnología, proceso de fabricación, etc.

Por otro lado, el almacenamiento **líquido** es más costoso pues se requiere llegar a temperaturas muy bajas, pero cuentan con la ventaja de poder almacenar más hidrógeno que los anteriores por unidad de volumen al estar el hidrógeno más concentrado.

Un tanque de 10 m³ estaría alrededor de los **40.000 €** debido a la alta tecnología de criogenización que posee [36].

Por ello si tenemos en cuenta que en una hidrogenera de tamaño pequeño podemos tener una capacidad de unos 20 m³, un almacenamiento gaseoso estaría en torno a los 30.000 € y uno líquido en torno a 80.000 €. Quedando el precio de una de tamaño medio entre las dos.

El caso contrario de contar con una infraestructura de mayor tamaño dispararía los costes, rondando los 200.000 € y los 700.000 € respectivamente.

Presupuesto para aeronaves:

Estimar con precisión los costes asociados con la transición de aeronaves al uso de hidrógeno es una tarea desafiante en la actualidad, dada la falta de desarrollos específicos y la naturaleza emergente de la tecnología.

Los **motores** de aeronaves necesitarían modificaciones significativas para adaptarse al uso de hidrógeno como combustible, lo que podría implicar cambios en la cámara de combustión, sistemas de inyección, y otros componentes clave. Sin embargo, debido a la ausencia de proyectos plenamente desarrollados y comercializados, no existen estimaciones de costes precisas para estas adaptaciones.

En cuanto a la distribución de **tanques** de combustible y otras tecnologías relacionadas, el diseño de sistemas de almacenamiento y entrega de hidrógeno a bordo de aeronaves es un campo aún en desarrollo. La ubicación, el tamaño y la integración de los tanques de hidrógeno son aspectos clave que afectarán los costes, pero hasta que se establezcan estándares y se realicen desarrollos más avanzados, es difícil proporcionar cifras específicas.

Además, la estimación de costes también dependerá de la magnitud de las modificaciones requeridas y del tipo de aeronave en cuestión. A medida que avances específicos en la tecnología de propulsión de hidrógeno y diseño de aeronaves se materialicen en proyectos piloto o comerciales, se podrán realizar evaluaciones más precisas de los costes asociados. Hasta entonces, la falta de datos concretos sobre desarrollos y proyectos específicos limita nuestra capacidad para proporcionar cifras exactas en este momento.

Presupuesto para handling:

Uno de los puntos principales a destacar en este apartado es la comparación del precio de un depósito de hidrógeno vs uno de combustible convencional con los precios de enero 2024.

- **Depósito de diésel:**

$$\text{Precio Dep.} = 60 \text{ litros} \cdot 1,5 \frac{\text{€}}{\text{litro}} = 90 \text{ €} \quad (5)$$

$$\text{Km Dep.} = \frac{60 \text{ litros}}{7 \text{ litros a los } 100 \text{ Km}} = 857 \text{ Km} \quad (6)$$

- **Depósito de hidrógeno:**

$$\text{Precio Dep.} = 6 \text{ Kg} \cdot 8 \frac{\text{€}}{\text{Kg}} = 48 \text{ €} \quad (7)$$

$$\text{Km Dep.} = \frac{6 \text{ Kg}}{0,9 \text{ Kg a los } 100 \text{ Km}} = 666 \text{ Km} \quad (8)$$

Gracias a estos cálculos podemos establecer el dato que realmente nos interesa para el diésel y el hidrógeno respectivamente:

$$\frac{90 \text{ €}}{857 \text{ Km}} = 0,105 \text{ € por Km} \quad (9)$$

$$\frac{48 \text{ €}}{666 \text{ Km}} = 0,072 \text{ € por Km} \quad (10)$$

De este modo estaríamos hablando que hoy en día el precio de **diésel** es alrededor de un **50% más caro** que el hidrógeno, siendo el hidrógeno una tecnología con mucho camino por delante.

Cabe mencionar que el precio del combustible convencional se encuentra en una situación desfavorable debido al aumento causado por diversos factores, como la guerra en Ucrania y los niveles elevados de inflación.

La estimación de costes asociados con la transición de los vehículos de handling al uso de hidrógeno sigue siendo incierta en este momento debido a la falta de desarrollos específicos y proyectos plenamente comercializados. Las adaptaciones necesarias en los vehículos de handling para integrar sistemas de propulsión de hidrógeno, así como las infraestructuras de recarga y almacenamiento, son aspectos clave que aún están por definirse. Hasta que proyectos específicos se materialicen y proporcionen datos detallados sobre estas modificaciones, es difícil proporcionar estimaciones precisas de costes.

En relación con los vehículos convencionales que se desplazan dentro del aeropuerto, ya se ha mencionado anteriormente que el precio actual ronda los 70.000 € [33]. Es importante destacar que esta cifra podría ser un punto de partida y que la tendencia es que los costes disminuyan a medida que la tecnología evoluciona y se optimiza. Estos vehículos impulsados por hidrógeno podrían coexistir con opciones eléctricas,

ofreciendo flexibilidad a los aeropuertos en su transición hacia fuentes de energía más sostenibles.

En cuanto a la formación del personal que operará estos vehículos se presenta como una inversión clave en este proceso de transición. Proporcionar una capacitación adecuada permitirá a los trabajadores adquirir las habilidades necesarias para operar eficientemente los nuevos vehículos, maximizando así los beneficios ambientales y mejorando la sostenibilidad en las operaciones aeroportuarias.

REFERENCIAS

- [1] Our World in Data “Emisiones globales de gases de efecto invernadero por sector”. septiembre 2020 (Hannah Ritchie). <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>
- [2] OACI (Canada’s aviation climate action plan) “The pathways to achieve net-zero by 2050”, septiembre 2022. <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ActionPlan/CANADAs-AVIATION-CLIMATE-ACTION-PLAN-2022-2030.pdf#search=emissions%20in%202030>
- [3] AERTEC, Antonio J. Zafra Ibáñez “Hidrógeno en aviación”
- [4] SosteniBlog, Javier Clemente “Almacenamiento de energía renovable”, mayo 2023. <https://sosteniblog.com/guia-completa-sobre-el-almacenamiento-de-energia-renovable/>
- [5] Google Images “Imagen de un átomo de Hidrógeno a través de un microscopio cuántico”
- [6] Biblus, Clara Fernández-Bolaños Badía “Energética del hidrógeno” <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/3823/fichero/2.4+Propiedades+del+Hid%C3%B3geno.pdf>
- [7] Naukas, Francisco R. Villatoro “Diferencia entre incendio del motor de gasolina y de hidrógeno”. <https://francis.naukas.com/2011/01/05/la-diferencia-entre-el-incendio-del-motor-de-un-coche-de-hidrogeno-y-uno-de-gasolina/>
- [8] ResearchGate, Roque Aguado Molina “Hidrógeno y su almacenamiento: el futuro de la energía eléctrica”, febrero 2021. https://www.researchgate.net/publication/348991177_Hidrogeno_y_su_almacenamiento_el_futuro_de_la_energia_electrica
- [9] Canal YouTube Naturgy, “El transporte de hidrógeno: la importancia del amoniaco”. <https://www.youtube.com/watch?v=9eZR8IntETU>
- [10] Repsol Fundación, “Sobre la rentabilidad de las hidrogeneras y el coste final del hidrógeno”. <https://openroom.fundacionrepsol.com/es/contenidos/donde-llenar-vehiculo-hidrogeno>
- [11] Agencia internacional de la energía, “Estudio coste estación repostaje de hidrógeno en diversas escalas”.
- [12] ASME (American Society of Mechanical Engineers), “Hydrogen Piping and Pipelines”. <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b31-12-hydrogen-piping-pipelines>
- [13] Canal YouTube Voith Group, “H2 tanks type 1 – type 5, technological differences and advantages”, febrero 2023. <https://www.youtube.com/watch?v=AHzjAYniPmY>
- [14] H2 Clipper “The hydrogen delivery company”. <https://www.h2clipper.com/>

[15] JECComposites, “Collins Aerospace to lead the development of thermoplastics for liquid hydrogen tanks”, marzo 2023.

<https://www.jeccomposites.com/news/collins-aerospace-to-lead-the-development-of-thermoplastics-for-liquid-hydrogen-tanks/>

[16] Leeham News and Analysis, Bjorn Fehrm: “Bjorn’s Corner: Sustainable Air Transport”.

<https://leehamnews.com/2022/04/01/bjorns-corner-sustainable-air-transport-part-13-hydrogen-fuel-system-and-apu/>

[17] Airbus, “How to store liquid hydrogen for zero-emission flight”.

<https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2021-12-how-to-store-liquid-hydrogen-for-zero-emission-flight>

[18] Google Earth, “Imagen Aeropuerto Madrid-Barajas desde el aire”

[19] Archivo digital UPM, E. Amador Cayuela, “Sistema fotovoltaico para autoconsumo”.

<https://oa.upm.es/43431/>

[20] Aerospace Technology Institute, “Hydrogen infrastructure and operations”, marzo 2022.

<https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/03/FZO-CST-POS-0035-Airports-Airlines-Airspace-Operations-and-Hydrogen-Infrastructure.pdf>

[21] AERTEC, “Proyecto Hyport (Proyecto todavía en desarrollo de investigación)”.

<https://aertecsolutions.com/aviation/>

[22] Tagesspiegel, “Wasserstoff aus Tegel Zukunft in der Frachthalle”, marzo 2023.

<https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/wasserstoff-fur-deutschland-frachthalle-in-tegel-als-zukunftsort-9528425.html>

[23] Airbus, “UK hydrogen alliance”, septiembre 2023.

<https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2023-09-uk-hydrogen-alliance-established-to-accelerate-zero-carbon-aviation>

[24] Sha Aviation, “Turboprop vs Piston Airplanes”, mayo 2022.

<https://www.sha-aviation.co.za/blog/turboprop-vs-piston-airplanes/>

[25] Quora, “Why do some regional airlines use propeller-based planes when there are jet-based planes with similar capacity?”, Noviembre 2018.

<https://www.quora.com/Why-do-some-regional-airlines-use-propeller-based-planes-when-there-are-jet-based-planes-with-similar-capacity>

[26] Google images “ATR vs A350”

[27] Nasa, “Liquid hydrogen as a propulsion fuel”, Web: <https://history.nasa.gov/SP-4404/ch8-8.htm>

[28] Dries Vestraete, “The potential of liquid hydrogen for long range aircraft propulsion”.

[29] Airbus, “ZEROe: Towards the world’s first hydrogen-powered commercial aircraft”, Web:

<https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe>

[30] Boeing, “Proyecto ECODemonstrator”.
<https://www.boeing.com/principles/environment/ecodemonstrator>

[31] Google images, “Vehículos Handling”

[32] Hidrógeno Verde, “BMW explica todo lo que debes saber de un coche de pila de combustible (FCEV)”.
<https://hidrogeno-verde.es/bmw-cuestiones-sobre-coche-pila-combustible-fcev/>

[33] Movilidad Eléctrica, “Los 2 coches de Hidrógeno que se pueden comprar en España en 2023”.
<https://movilidadelectrica.com/coches-hidrogeno/>

[34] MMTubería, “Las tuberías de acero al carbono y la transportación de gas”.
<https://www.mmtuberia.com/blog/las-tuberias-de-acero-al-carbono-y-la-transportacion-de-gas>

[35] Pac Stainless Ltd.
<https://www.pacstainless.com/es/products/specialty-alloy-tubing/titanium-grade-2-tubing/>

[36] Aviación digital.
<https://aviaciondigital.com/airbus-espana-deposito-hidrogeno-liquido/>